

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Institut dopravy

Modely pro optimalizaci pravidelných jízdních řádů
linek s uzavřeným oběhovým režimem
a jednobodovou časovou koordinací

Periodic Timetable of Routes with Closed Scheduling
Vehicles and Time Coordination in One Point
Optimization Models

Student: Bc. Filip Lorenz
Vedoucí diplomové práce: Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

Ostrava 2013

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Filip Lorenz**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T003 Dopravní technika a technologie
Specializace: 30 Technologie dopravy
Téma: Modely pro optimalizaci pravidelných jízdních řádů linek s uzavřeným oběhovým režimem a jednobodovou časovou koordinací
Periodic Timetable of Routes with Closed Scheduling Vehicles and Time Coordination in One Point Optimization Models

Zásady pro vypracování:

Osnova práce:

Úvod.

1. Význam řešeného problému z pohledu teoretického a praktického využití.
2. Analýza použitelnosti jednotlivých typů optimalizačních metod pro řešení zadaného problému, identifikace vhodných typů optimalizačních metod.
3. Teoretická východiska řešení - popis základních poznatků potřebných pro řešení zadaného problému u typů optimalizačních metod zvolených k řešení v bodě 2.
4. Analýza zdrojů disponibilních vstupních dat.
5. Návrh modelů pro optimalizaci jízdního řádu.
6. Výpočetní experimenty s navrženými modely v podmínkách konkrétní úlohy - charakteristika praktického problému, příprava vstupních dat, sestava modelu pro konkrétní zadání, realizace výpočetních experimentů.
7. Zhodnocení dosažených výsledků, zhodnocení poznatků a zkušeností získaných v průběhu řešení zvolenými optimalizačními metodami (z pohledu potvrzení správnosti volby typu, výpočetní náročnosti sestavených modelů, nutnosti transformace výsledků za účelem jejich interpretace a přímé aplikace apod.), formulace doporučení.

Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

Plevný, M.: Žižka, M.. Modelování a optimalizace v manažerském rozhodování. Plzeň: ZČU v Plzni, 2005. 296 s. ISBN 80-7043-435-X
Surovec, P. Technológia hromadnej osobnej dopravy. Žilina: ŽU v Žilině, 1998. 157 s. ISBN 80-7100-494-4

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 15.5.2013



podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 15.5.2013



podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Filip Lorenz

Adresa trvalého pobytu autora práce: Havlíčkovo nám. 741/12, Ostrava – Poruba, 708 00

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

LORENZ, F. *Modely pro optimalizaci pravidelných jízdních řádů linek s uzavřeným oběhovým režimem a jednobodovou časovou koordinací.*

Ostrava: Institut dopravy VŠB – TUO, 2013. 66 s.

Diplomová práce, vedoucí: Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

Cílem předložené diplomové práce, je časová koordinace spojů pravidelné autobusové linky spojující Ostravu s letištěm Leoše Janáčka v Mošnově.

Předmětem bude návrh matematického modelu, který umožní sestavit jízdní řád. Úvod práce je věnován významu řešeného problému, možného použití jednotlivých typů optimalizačních metod a analýze zdrojů disponibilních vstupních dat.

Hlavní část práce je zaměřena na návrh původního modelu pro návrh jízdního řádu, což umožní přímé použití výsledků práce v praxi. Výpočetní experimenty byly provedeny v optimalizačním software Xpress – IVE v podmínkách připravované letní sezony 2013.

V závěru práce je věnována pozornost zhodnocení dosažených výsledků.

ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS

LORENZ, F. *Periodic Timetable of Routes with Closed Scheduling Vehicles and Time Coordination in One Point Optimization Models.*

Ostrava: Institute of transport, VŠB – Technical University of Ostrava, 2013. 66 s.

Diploma thesis, supervisor: Ing. Dušan Teichmann, Ph.D.

The aim of this diploma thesis is the time coordination of regular bus transports service connecting Ostrava with of Leoš Janáček Airport in Mošnov.

The subject of the proposal will be a mathematical model that would build up a timetable.

The introduction of the thesis is dedicated to the importance of the problem, possible use of different types of optimization methods and analysis of available sources of input data.

The main part of the thesis is focused on the design of a original model for the design of timetable, which allows the direct application of the results of work in practice. Computational experiments were performed in optimization software Xpress – IVE in conditions of upcoming summer season 2013.

In the conclusion, attention is given to evaluation of achieved results.

Poděkování

Touto formou bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu Ing. Dušanu Teichmannovi, Ph.D., který mi věnoval svůj čas a poskytnul mi neocenitelné rady při zpracování diplomové práce.

Dále bych chtěl tímto poděkovat také panu Ing. Luboru Sobkovi, Ph.D. za poskytnutí informací o plánu charterových letů vypravovaných v letní sezoně 2013 z letiště Ostrava a konzultační činnost týkající se plynulého procesu odbavení cestujících před odletem a po přiletu.

Obsah

Seznam použitých zkratk	10
Úvod	13
1. Význam řešeného problému z pohledu teoretického a praktického využití	14
2. Analýza použitelnosti jednotlivých typů optimalizačních metod pro řešení zadaného problému, identifikace vhodných typů optimalizačních metod	16
2.1 Modely pro časovou koordinaci spojů na úsecích dopravních sítí	18
2.2 Model pro časovou koordinaci spojů v uzlech	21
2.3 Zhodnocení existujících modelů pro koordinaci spojů	25
3. Výskyt situací vyžadujících sestavení modelu časové koordinace na definované bázi	26
3.1 Charakteristika linek zajišťujících dopravní obslužnost letišť	26
3.1.1 Charakteristika dopravního spojení zabezpečovaného linkou č. 910100 (letišť Ostrava)	26
3.1.2 Charakteristika dopravního spojení na letišť v ČR a na Slovensku	27
3.2 Charakteristika linek s pravidelným provozem uzavřeným oběhovým režimem v podmínkách běžných linek MHD	31
3.3 Shrnutí	32
4. Analýza zdrojů disponibilních vstupních dat pro potřeby modelu	33
5. Návrh modelů pro optimalizaci jízdního řádu	36
5.1 Návrh modelu v obecném tvaru	37
5.2 Text programu navrženého modelu v programu Xpress – IVE	41
6. Výpočetní experimenty s navrženým modelem v podmínkách řešené úlohy	49
6.1 Charakteristika konkrétního problému	49
6.2 Příprava vstupních dat	49
6.3 Matematický model řešené úlohy s konkrétními hodnotami	53
7. Zhodnocení dosažených výsledků	55

Závěr.....	64
Seznam obrázků	66
Seznam tabulek.....	66

Seznam použitých zkratk

t_p	celková doba přemístění,
t_l	doba chůze od zdroje k zastávce veřejné hromadné dopravy,
$t_{\check{c}}$	doba čekání na spoj,
t_{dp}	doba pobytu v dopravním prostředku,
$t_{př}$	doba přestupu (doba chůze a doba čekání na spoj při přestupu),
t_2	doba chůze od zastávky k cíli přemístění,
t_i	nejdříve možná časová poloha spoje $i = 1 \dots n$,
a_i	maximální dovolený posun spoje $i = 1 \dots n$ vztahmo k jeho nejdříve možné časové poloze,
x_i	časový posun spoje $i = 1 \dots n$ vztahený ke zvolené krajní časové poloze,
d	minimální časový rozestup mezi dvěma sousedními časovými polohami v místě koordinace,
h	maximální časový rozestup mezi dvěma sousedními časovými polohami v místě koordinace,
t_{pi}	nejdříve možný čas příjezdu spoje $i \in I$,
t_{oj}	nejdříve možný čas odjezdu spoje $j \in J$,
a_i	maximální dovolený posun spoje $i \in I$,
b_j	maximální dovolený posun spoje $j \in J$,
f_i	intenzita cestujících přestupujících ze spoje $i \in I$,
t_{pres}	přestupní doba,
T	prohibitivní konstant,
x_i	časový posun příjíždějícího spoje $i \in I$,
y_j	časový posun odjíždějícího spoje $j \in J$,
z_{ij}	bivalentní proměnná, která rozhoduje o vzniku přestupní vazby mezi příjíždějícím spojem i a odjíždějícím spojem j ,
h_i	časová ztráta cestujícího příjíždějícího do přestupního uzlu spojem $i \in I$,
t_{presl}	celková přestupní doba mezi odlety charterových letů a příjezdem spoje,
$Todbl$	doba pro odbavení cestujícího, tato hodnota bude nastavena na 75 minut před časem pravidelného odletu,

$Tpres1$	doba pro přesun cestujícího mezi zastávkou a odbavovacím terminálem, tato hodnota bude nastavena na 10 minut,
$tpres2$	celková přestupní doba mezi příletem charterového letu a odjezdem autobusového spoje,
$Todb2$	doba pro odbavení cestujícího, tato hodnota bude nastavena na 30 minut po času pravidelného příletu,
$Tpres2$	doba pro přesun cestujícího mezi odbavovací přepážkou a stanovištěm odjíždějícího autobusového spoje, tato hodnota bude nastavena na 10 minut po ukončení procesu odbavení po čase pravidelného příletu,
I	množina autobusových spojů příjíždějících na letiště z Ostravy,
J	množina časových poloh odletů (charterových letů) z letiště Ostrava,
K	množina autobusových spojů odjíždějících z letiště Ostrava,
L	množina časových poloh příletů (charterových letů) na letiště,
$tpres1$	přestupní doba mezi výstupní zastávkou autobusového spoje a odbavovací přepážkou letištního terminálu (přestupní doba před odletem),
$tpres2$	přestupní doba mezi odbavovací přepážkou letištního terminálu a nástupní zastávkou autobusového spoje (přestupní doba po příletu),
A_l	počet příletů za sezónu v časové poloze $l \in L$,
B_j	počet odletů za sezónu v časové poloze $j \in J$,
$tnmp1_i$	nejdříve možný okamžik příjezdu autobusového spoje $i \in I$ na letiště Ostrava,
$tnmo1_j$	nejdříve možný okamžik odletu $j \in J$,
$tnmo2_k$	nejdříve možný okamžik odjezdu autobusového spoje $k \in K$ z letiště Ostrava,
$tnmp2_l$	nejdříve možný okamžik příletu $l \in L$,
N	maximální dovolený posunů pro spoje $i \in I$ a $j \in J$,
ts	doba spoje pro každý směr,
tc	obratová doba na konečné zastávce,
h_j	časová ztráta cestujících, kteří přijeli na letiště autobusovým spojem před odletem $j \in J$,
q_l	časová ztráta cestujících, kteří odjíždějí z letiště autobusovým spojem po příletu $l \in L$,

$z_{i,j}$	proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi okamžikem příjezdu autobusového spoje $i \in I$ a vhodným okamžikem začátku odbavení pro spoje odlétající v časové poloze $j \in J$,
$m_{k,l}$	proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi vhodným okamžikem ukončení odbavení po příletu v časové poloze $l \in L$ a odjezdem navazujícího přípojného autobusového spoje umístěného do časové polohy $k \in K$,
x	časový posun soustavy autobusových spojů vztažmo k nejdříve možné časové poloze,
VHD	veřejná hromadná doprava.

Úvod

Motivací k řešení problému je zvýšení plynulosti přepravního procesu při návozu a odvozu cestujících využívajících k přepravě charterové letecké linky, které jsou vypravovány z letiště Ostrava. Konkrétně se bude jednat o odstranění zbytečných prostojů cestujících, kteří k přepravě na/z letiště předcházející/následující po charterové letecké přepravě do přímořských letovisek použijí veřejnou autobusovou dopravu.

V důsledku provedené koordinace je možno identifikovat následující pozitivní dopady jak na dopravce tak i na cestující. Přínosem pro dopravce je zvýšení počtu cestujících, kteří jeho nabídku spojů budou využívat, protože spoje budou z pohledu plánovaných časů odletů a příletů naplánovány v atraktivnějších časových polohách. Přínosy pro cestující jsou také pozitivní, protože se nejen minimalizují jejich doby čekání na odlet, příp. po příletu doby čekání na odjezd autobusu (rozhodnou-li se využít při přepravě na letiště veřejnou hromadnou dopravu), ale také i jejich finanční náklady na přepravu na/z letiště z/do místa bydliště (veřejná hromadná doprava je levnější než taxislužba).

Je-li při optimalizaci nabídky spojení letiště a města vyžadována pravidelnost jízdního řádu, nelze očekávat, že by v rámci optimalizace bylo možno minimalizovat časové ztráty pro všechny cestující současně. Důležité však je, aby se časové ztráty minimalizovaly v rámci celého zadaného období, z pohledu optimalizace to znamená najít globální optimum nebo jemu blízké suboptimum v řešeném případě za celou letní sezonu.

1. Význam řešeného problému z pohledu teoretického a praktického využití

Na každém přepravním procesu jsou zpravidla zúčastněny dva klíčové subjekty. Prvním klíčovým subjektem se rozumí subjekt, který přepravní proces využívá – v osobní přepravě je to cestující, v nákladní přepravě odesílatel nebo jiná osoba, která jej zastupuje. Druhým klíčovým subjektem se rozumí subjekt, který přepravní službu poskytuje, tj. dopravce. Každý z uvedených subjektů preferuje ve své činnosti určitá kritéria, která mohou být jak protichůdná, tak také mohou vzájemně kooperovat, resp. být významově blízká. Ke kritériím preferovaným cestujícími odborná literatura řadí dobu přemístění, pravidelnost a spolehlivost nabízené služby, pohodlí ve vozidle a cenu za přepravu. Dopravce ve veřejné hromadné dopravě je na druhou stranou limitován výši finančních prostředků, které jsou mu poskytovány zpravidla formou účelových dotací. Důležitým jevem v této souvislosti je, aby zákazník i dopravce dokázali v rámci svých preferencí najít kompromis. S ohledem na aplikační část řešeného tématu bude pozornost dále věnována pouze procesům v osobní přepravě.

Je-li přepravní proces složen z více fází, přičemž cestující v rámci něj využívá k přepravě více spojů jednoho nebo více druhů dopravy (je tedy nucen přestupovat), preferuje, kromě výše uvedených kritérií, zpravidla také řešení, při kterém nevznikají zbytečné časové prodlevy při přestupech, tj. kritérium plynulosti přepravního procesu. Z pohledu dopravce nebo dopravců participujících na předmětném přepravním procesu to znamená vyšší nároky na časovou koordinaci spojů v místech, kde k přestupům cestujících dochází. Nevěnuje-li dopravce této stránce patřičnou pozornost, může se lehce stát, že nabídka jeho služeb nebude využívána, ztrátovost služby se bude prohlubovat a dotační úřad bude ztrácet zájem o nabídku jeho služeb.

V souvislosti s řešeným tématem je třeba uvést, že existují přepravní řetězce, ve kterých figurují dopravci, jejichž spoje mají vyšší prioritu z pohledu koordinace, což vyvolává nutnost ostatních dopravců se jejich nabídce organizačně přizpůsobit. Např. je daleko jednodušší přizpůsobit příjezd autobusu odjezdu vlaku kategorie SC nebo odletu letadla než naopak.

Jedním z nejdůležitějších úkolů dopravního inženýrství (míněno nyní obecně, nikoliv jako organizace provozu silniční dopravy) vytvářet podpůrné nástroje pro to, aby bylo možno dopravní procesy plánovat tak, aby probíhaly optimálně.

Teoretickým přínosem předložené práce je vytvoření obecně použitelné metody pro rozšíření časové koordinace, jejíž aplikační potenciál není omezen pouze na konkrétní situace např. druh dopravy.

Praktický význam řešeného problému spočívá ve tvorbě nástroje, sloužícího pro praktickou podporu rozhodování dopravce umožňujícího zvyšování časové provázanosti spojů, mezi kterými se přestupuje. Výhoda předpokládaného nástroje se projeví zejména v situaci, kdy bude zapotřebí vytvořit jízdní řád konkrétní linky.

2. Analýza použitelnosti jednotlivých typů optimalizačních metod pro řešení zadaného problému, identifikace vhodných typů optimalizačních metod

Obecně platí, že doba přemístění cestujícího mezi zdrojem a cílem jeho cesty je složena z několika dílčích složek. Hodnota celkové doby přemístění ovlivňuje volbu cestujícího ve smyslu plánování využití jednotlivých druhů dopravy. Pokud cestující v rámci své jízdy nepřestupuje mezi více spoji, nevzniká mu časová ztráta plynoucí z přestupu. Zpravidla však cestující nemají volby přímého dopravního spojení a jsou tedy nuceni přestupovat. Přestupují-li mezi spoji, které nejsou časově zkoordinovány, může vzniknout poměrně významná časová ztráta, o kterou se celková doba přemístění prodlužuje.

Odborná literatura [2] pro výpočet celkové doby přemístění uvádí obecný vzorec ve tvaru:

$$t_p = t_1 + t_{\check{c}} + t_{dp} + t_{p\check{r}} + t_2 \quad (2.1)$$

kde:

t_p	celková doba přemístění,
t_1	doba chůze od zdroje k zastávce veřejné hromadné dopravy,
$t_{\check{c}}$	doba čekání na spoj,
t_{dp}	doba pobytu v dopravním prostředku,
$t_{p\check{r}}$	doba přestupu (doba chůze a doba čekání na spoj při přestupu),
t_2	doba chůze od zastávky k cíli přemístění.

Ze vztahu (2.1) vyplývá, že časové ztráty při přestupech ovlivňují celkovou dobu přemístění (jedná se o $t_{\check{c}}$ a $t_{p\check{r}}$). Jak již bylo uvedeno, celkovou dobu přemístění je možno zkrátit v důsledku správné časové koordinace při existujících přestupech (je-li možná).

Z pohledu matematické teorie dopravy se rozlišují dva základní typy časové koordinace – časová koordinace z hlediska úseků a časová koordinace z hlediska uzlů. Přestože v obou případech jde o úlohy koordinačního typu, které mají za cíl optimalizovat efektivní přepravní nabídku, existují mezi nimi některé zásadní rozdíly. Stěžejní rozdíl lze spatřovat v optimalizačním kritériu, které se v jednotlivých přístupech používá.

V úlohách o koordinaci přepravní nabídky na úsecích dopravních sítí se zpravidla jedná o to, aby přepravní nabídka byla z pohledu zvoleného časového období co nejrovnoměrnější, to znamená, aby odjezdy spojů z koordinační zastávky byly pokud možno pravidelné nebo pravidelnosti se blíží. Míra pravidelnosti je zároveň optimalizačním kritériem. Protože koordinovaný úsek je tvořen minimálně dvěma uzly, které jej ohraničují, je zapotřebí určit místo, které bude z hlediska koordinace rozhodující. V podmínkách rovnoběžného grafikonu (nabídka je homogenní, tzn., všechny spoje jedou stejnou rychlostí a obsluhují stejnou množinu uzlů na řešeném úseku) je situace jednoduchá. Nezáleží totiž, zda se místo koordinace nachází na začátku nebo konci, nebo uvnitř úseku. V podmínkách nerovnoběžného grafikonu (ostatní případy) je situace složitější. Je totiž nutno počítat s tím že místo koordinace může ovlivnit časovou rovnoměrnost nabídky (jsou-li koordinovány všechny spoje nebo alespoň spoje různých rychlostí).

Ve srovnání s tím, je v rámci časové koordinace spojů v uzlech cílem, aby jednotlivé, na sebe navazující spoje, mezi kterými se přestupuje, z časového hlediska na sebe co nejvíce navazovaly, resp. umožnit, aby spoj, na který se přestupuje, odjížděl co nejdříve po příjezdu spoje, ze kterého se přestupuje. Důvod je zřejmý, nemá vznikat časová ztráta související s čekáním na odjezd nejbližšího přípojného spoje. Kritériem je celková časová ztráta přestupujících cestujících.

Protože optimalizační kritéria jsou pro oba modely rozdílná, řešení dosažená z pohledu jednoho optimalizačního kritéria budou zpravidla mít různou úroveň výhodnosti z pohledu druhého optimalizačního kritéria. V těchto případech je rozhodující preference zadavatele, z pohledu optimalizačního kritéria, tj. které z uvedených dvou kritérií upřednostní.

V následujících dvou podkapitolách budou zmíněny existující matematické modely pro časovou koordinaci spojů a to jak na úsecích, tak v uzlech. Nejdříve bude uvedena obecná formulace problému časové koordinace spojů na úsecích dopravní sítě.

2.1 Modely pro časovou koordinaci spojů na úsecích dopravních sítí

Matematické modely vznikly v souvislosti s řešením diplomové práce P. Kozla [11], obhájené v roce 2009 na Fakultě strojní VŠB-TU Ostrava. Zadání úlohy lze obecně zformulovat následujícím způsobem. Je dán úsek dopravní sítě pojížděný v řešeném období zadaným počtem n spojů. Pro každý spoj $i = 1 \dots n$ je definována jeho aktuální časová poloha vztažmo ke zvolenému místu koordinace a časový interval, ve kterém je přípustné s daným spojením posunovat v čase. Úkolem je rozhodnout o posunech spojů v přípustných intervalech tak, aby jejich časové polohy byly rozloženy co nejrovnoměrněji.

Zrovnoměňování přepravní nabídky z časového hlediska můžeme provádět prostřednictvím následujících kritérií:

- 1) minimálního časového rozestupu mezi dvěma po sobě jedoucími spoji, jehož hodnota je maximalizována,
- 2) maximálního časového rozestupu mezi dvěma po sobě jedoucími spoji, jehož hodnota je minimalizována.

Aby bylo možno pro koordinaci využít lineární programování, jehož devizou je dosažení optimálního řešení, postupuje se tak, že se před zahájením procesu optimalizace všechny spoje přesunou do nejdříve možných nebo nejpozději přípustných časových poloh. V rámci procesu optimalizace budou tedy proměnné modelující tyto posuny vztaženy buď k těmto nejdříve možným časovým polohám, nebo nejpozději přípustným časovým polohám. Na tuto skutečnost je nutno dbát při závěrečné interpretaci optimálního řešení, resp. určení skutečných časových posunů. Jsou-li jako výchozí časové polohy zvoleny nejdříve možné polohy spojů, vypočítané optimální časové posuny budou shodné se skutečnými pouze v případě, že aktuální časová poloha spoje odpovídá nejdříve možné časové poloze. Jsou-li jako výchozí časové polohy zvoleny nejpozději přípustné polohy spojů, vypočítané optimální časové posuny budou shodné se skutečnými pouze v případě, že aktuální časová poloha spoje odpovídá nejpozději možné časové poloze.

Označení veličin vyskytujících se v matematickém modelu

t_i	nejdříve možná časová poloha spoje $i = 1 \dots n$ (v modelu má charakter konstanty),
a_i	maximální dovolený posun spoje $i = 1 \dots n$ vztahmo k jeho nejdříve možné časové poloze (v modelu má charakter konstanty),
x_i	časový posun spoje $i = 1 \dots n$ vztahený ke zvolené krajní časové poloze (v modelu má charakter proměnné),
d	minimální časový rozestup mezi dvěma sousedními časovými polohami v místě koordinace (v modelu má charakter proměnné),
h	maximální časový rozestup mezi dvěma sousedními časovými polohami v místě koordinace (v modelu má charakter proměnné).

Varianta č. 1

V rámci této varianty proměnná d modeluje hodnotu minimálního rozestupu, která se maximalizuje.

Matematický model má tvar:

$$\max f(x, d) = d \quad (2.2)$$

za podmínek:

$$x_i \leq a_i \quad \text{pro } i = 1 \dots n \quad (2.3)$$

$$t_{i+1} + x_{i+1} - (t_i + x_i) \geq d \quad \text{pro } i = 1 \dots n - 1 \quad (2.4)$$

$$x_i \geq 0 \quad \text{pro } i = 1 \dots n \quad (2.5)$$

$$d \geq 0 \quad (2.6)$$

Funkce (2.2), reprezentuje zvolené optimalizační kritérium - minimální rozestup mezi dvěma sousedními spoji.

Skupina omezujících podmínek (2.3) zajišťuje, že posuny jednotlivých spojů v čase, počítáno od nejdříve možných časových poloh spojů, nepřesáhnou maximální dovolené hodnoty.

Skupina omezujících podmínek (2.4) zajišťuje vazbu mezi soustavou omezujících podmínek a účelovou funkcí, zároveň jsou těmito podmínkami kvantifikovány rozestupy mezi dvojicemi sousedních spojů.

Skupiny omezujících podmínek (2.5) a (2.6) vyjadřují definiční obory proměnných v řešené úloze.

Pokud by byly za výchozí polohy spojů před optimalizací voleny nejpozději přípustné časové polohy, přešla by skupina omezujících podmínek (2.4) do tvaru:

$$t_{i+1} - x_{i+1} - (t_i - x_i) \geq d \quad \text{pro } i = 1 \dots n - 1 \quad (2.7)$$

Varianta č. 2

V rámci této varianty proměnná h modeluje hodnotu maximálního rozestupu, která se minimalizuje.

Matematický model má tvar:

$$\min f(x, h) = h \quad (2.8)$$

Za podmínek:

$$x_i \leq a_i \quad \text{pro } i = 1 \dots n \quad (2.9)$$

$$t_{i+1} + x_{i+1} - (t_i + x_i) \leq h \quad \text{pro } i = 1 \dots n - 1 \quad (2.10)$$

$$x_i \geq 0 \quad \text{pro } i = 1 \dots n \quad (2.11)$$

$$y \geq 0 \quad (2.12)$$

Funkce (2.8), reprezentuje zvolené optimalizační kritérium - maximální rozestup mezi dvěma sousedními spoji.

Skupina omezujících podmínek (2.9) zajišťuje, že posuny jednotlivých spojů v čase počítáno od nejdříve možných časových poloh spojů nepřesáhnou maximální dovolené hodnoty.

Skupina omezujících podmínek (2.10) zajišťuje vazby mezi soustavou omezujících podmínek a účelovou funkcí, zároveň jsou těmito podmínkami kvantifikovány rozestupy mezi dvojicemi sousedních spojů.

Skupiny omezujících podmínek (2.11) a (2.12) vyjadřují definiční obory proměnných v řešené úloze.

Pokud by byly za výchozí polohy spojů před optimalizací voleny nejpozději přípustné časové polohy, přešla by skupina omezujících podmínek (2.10) do tvaru:

$$t_{i+1} - x_{i+1} - (t_i - x_i) \leq h \quad \text{pro } i = 1 \dots n - 1 \quad (2.11)$$

2.2 Model pro časovou koordinaci spojů v uzlech

Matematický model vznikl v roce 2007 a jeho autorem je prof. RNDR Jaroslav Janáček, CSc. z Fakulty riadenia a informatiky Žilinské univerzity v Žilině. Zadání úlohy lze obecně zformulovat následujícím způsobem. Pro přestupní uzel je zadána množina příjíždějících spojů $i \in I$ a odjíždějících spojů $j \in J$. Pro každý příjíždějící spoj je definována intenzita cestujících f_i , kteří v uzlu přestupují na odjíždějící spoje. Dále známe přestupní dobu t_{pres} [min], aktuální dobu příjezdu spoje $i \in I$ a aktuální dobu odjezdu spoje $j \in J$. Jsou známy intervaly, ve kterých je dovoleno se spoji posunovat v čase. Šířka časového intervalu, ve kterém je dovoleno posunovat s příjíždějícím spojem $i \in I$, je označena symbolem a_i [min], šířka intervalu, ve kterém je dovoleno posunovat s odjíždějícím spojem $j \in J$, je označena symbolem b_j [min]. Úkolem je rozhodnout o posunech jednotlivých spojů tak, aby se minimalizovala celková časová ztráta přestupujících cestujících.

Analogicky jako v případě úsekové koordinace, je za účelem použité lineárního programování nutno přesunout všechny spoje do některé z krajních poloh (nejdříve možné nebo nejpozději přípustné).

Označení veličin vyskytujících se v matematickém modelu:

t_{pi}	nejdříve možný čas příjezdu spoje $i \in I$ (má charakter konstanty),
t_{oj}	nejdříve možný čas odjezdu spoje $j \in J$ (má charakter konstanty),
a_i	maximální dovolený posun spoje $i \in I$ (má charakter konstanty),
b_j	maximální dovolený posun spoje $j \in J$ (má charakter konstanty),
f_i	intenzita cestujících přestupujících ze spoje $i \in I$ (má charakter konstanty),
t_{pres}	přestupní doba (má charakter konstanty),
T	prohibitivní konstanta,
x_i	časový posun příjíždějícího spoje $i \in I$ (má charakter proměnné),
y_j	časový posun odjíždějícího spoje $j \in J$ (má charakter proměnné),
z_{ij}	bivalentní proměnná, která rozhoduje o vzniku přestupní vazby mezi příjíždějícím spojem i a odjíždějícím spojem j (má charakter proměnné),
h_i	časová ztráta cestujícího příjíždějícího do přestupního uzlu spojem $i \in I$ (má charakter proměnné).

Přestupní doba t_{pres} může být definována jednou hodnotou, nebo množinou hodnot, které zohledňují různé doby přestupů mezi jednotlivými spoji.

Z povahy definovaných rozhodnutí vyplývá, že proměnné x_i , y_i a h_i budou mít definiční obor množinu nezáporných čísel (alternativně může být použit definiční obor – množina celých nezáporných čísel), pro proměnnou z_{ij} přichází v úvahu definiční obor – množina hodnot 0 a 1, přičemž z hlediska jednotlivých hodnot této proměnné bude platit, že když proměnná $z_{ij} = 1$ vazba mezi danou dvojicí spojů vzniká, když hodnota proměnné $z_{ij} = 0$, tak vazba mezi dvojicí spojů nevzniká.

Matematický model pro časovou koordinaci v přestupních uzlech má tvar:

$$\min f(x, y, z, h) = \sum_{i \in I} f_i h_i \quad (2.12)$$

za podmínek:

$$(t_{odj} + y_j) - (t_{pri} + x_i) - t_{pres} \geq T(z_{ij} - 1) \quad \text{pro } i \in I, j \in J \quad (2.13)$$

$$(t_{odj} + y_j) - (t_{pri} + x_i) - t_{pres} \leq h_i + T(1 - z_{ij}) \quad \text{pro } i \in I, j \in J \quad (2.14)$$

$$\sum_{j \in J} z_{ij} = 1 \quad \text{pro } i \in I \quad (2.15)$$

$$x_i \leq a_i \quad \text{pro } i \in I \quad (2.16)$$

$$y_j \leq b_j \quad \text{pro } j \in J \quad (2.17)$$

$$x_i \geq 0 \ (x_i \in Z_0^+) \quad \text{pro } i \in I \quad (2.18)$$

$$y_j \geq 0 \ (y_j \in Z_0^+) \quad \text{pro } j \in J \quad (2.19)$$

$$z_{ij} \in \{0,1\} \quad \text{pro } i \in I, j \in J \quad (2.20)$$

$$h_i \geq 0 \ (h_i \in Z_0^+) \quad \text{pro } i \in I \quad (2.21)$$

Funkce (2.12), reprezentuje optimalizační kritérium celkovou časovou ztrátu všech přestupujících cestujících v daném přestupním uzlu. Hodnota intenzity přestupujících cestujících z jednotlivých příjíždějících spojů charakterizuje váhu jednotlivých přestupních vazeb.

Skupiny podmínek (2.13) a (2.14) jsou tzv. skupiny podmínek „buď a nebo“. To znamená, že vždy je aktivní pouze jedna z nich a druhá je v této situaci splnitelná za všech okolností (tzn. při jakýchkoliv hodnotách proměnných). Skupina omezujících podmínek (2.13) je aktivní v situacích, kdy přestupní vazbu mezi spoji není možno vytvořit z důvodu toho, že přípojný spoj je z časového hlediska nedostupný, protože čas odjezdu předchází časovému okamžiku, kdy je cestující (po přestupu) připraven k nástupu do vozidla. Uvažujme, že cestující přijel do uzlu spojem $i \in I$ a navazující přípojný spoj spadá do množiny $j \in J$. Nastane-li situace, kdy čas odjezdu přípojného spoje j předchází okamžiku, ve kterém je cestující příjíždějícím spojem $i \in I$ připraven k nástupu do vozidla, je hodnota výrazu na levé straně příslušné omezující podmínky záporná a tato podmínka je splnitelná pouze v situaci, že příslušná vazební proměnná $z_{ij} = 0$. Je-li výraz na levé straně omezující podmínky (2.13) záporný, je záporný také výraz na levé straně omezující podmínky (2.14), protože levé strany obou v obou skupinách podmínek jsou stejné. Je-li levá strana omezující podmínky (2.14) záporná je tato podmínka splněna při jakékoliv kombinaci hodnot proměnných h_i a z_{ij} .

Skupina omezujících podmínek (2.14) je aktivní v situacích, kdy přestupní vazbu mezi spoji je možno vytvořit z důvodu toho, že přípojný spoj je z časového hlediska dostupný, protože čas odjezdu následuje po časovém okamžiku, kdy je cestující připraven k nástupu do vozidla. Uvažujme, že cestující přijel do uzlu spojem $i \in I$ a navazující přípojný spoj spadá do množiny $j \in J$. Nastane-li situace, kdy čas odjezdu přípojného spoje j následuje po okamžik, ve kterém je cestující příjíždějícím spojem $i \in I$ připraven k nástupu do vozidla (nebo nastane právě v tomto okamžiku), je hodnota výrazu na levé straně příslušné omezující podmínky nezáporná. Je-li tato hodnota kladná, je podmínka splnitelná dvěma způsoby. Prvním způsobem je její pokrytí kladné levé strany prostřednictvím hodnoty proměnné h_i , druhým způsobem je její pokrytí prostřednictvím výrazu $T^*(1-z_{ij})$, když $z_{ij}=0$. Nastane-li pokrytí kladné levé strany prostřednictvím členu h_i , je zřejmé, že se to projeví v hodnotě účelové funkce, která proměnnou h_i obsahuje. Nastane-li pokrytí kladné hodnoty výrazem $T(1-z_{ij})$, tzn., že $z_{ij} = 0$, může proměnná h_i nabýt hodnoty 0, což je z hlediska hodnoty účelové funkce příznivý stav, protože hodnota účelové funkce se nezvyšuje (algoritmus bude hodnotu 0 vzhledem ke zvolenému typu extrému preferovat). Protože bude docházet k preferenci tohoto způsobu pokrytí je evidentní, že je třeba nastavit pravidla optimalizace tak, aby vztažmo ke každému příjíždějícímu spoji $i \in I$ nabyla proměnná z_{ij} hodnoty 1. Toho se dosáhne zařazením další skupiny podmínek (2.15). Ta zajistí požadovanou skutečnost. V modelu při řešení nastane situace, kdy hodnoty 1 nabude vždy ta proměnná z_{ij} , která vygeneruje nejnižší časovou ztrátu prostřednictvím proměnné h_i . Bude-li hodnota levé strany nulová, tzn., časová ztráta nevzniká, bude tato situace nejpríznivější, a tedy odpovídající proměnná z_{ij} bude pro tuto situaci rovna 1. Co se týče podmínky (2.13), ta je v případě nezáporné hodnoty výrazu na levé straně splnitelná jak při $z_{ij} = 0$ tak i při $z_{ij} = 1$.

Skupiny omezujících podmínek (2.16) a (2.17) zajistí, že posuny příjíždějících a odjíždějících spojů se uskuteční v povolených mezích.

Skupiny omezujících podmínek (2.18), (2.19), (2.20) a (2.21) vyjadřují definiční obory proměnných v řešené úloze.

2.3 Zhodnocení existujících modelů pro koordinaci spojů

Vhodnost existujících modelů je nutno posuzovat podle toho, do jaké míry zohledňují podmínky reálného provozu linky, která je předmětem řešení.

V předložené práci je uvažováno s provozem kyvadlové linky, na které jezdí spoje v obou směrech v pravidelných časových intervalech, v jedné ze zastávek má být zabezpečena časová koordinace, a linka je provozována v tzv. uzavřeném režimu. Uzavřený oběhový režim znamená, že linku obsluhují vozidla vyčleněná pouze pro její potřeby. Jak je patrné z tohoto úhlu pohledu, je možné ihned vyloučit modely realizující úsekovou koordinaci. Tyto modely jsou totiž primárně určeny pro zrovnoměňování nepravidelných časových poloh spojů obsluhujících zvolený úsek. Vyloučení těchto modelů je z toho důvodu, že rovnoměrnost nabídky v čase je v řešeném typu úlohy přímo vyžadována zadáním.

Co se týče využití existujícího matematického modelu pro časovou koordinaci v uzlech, tento model v původní formě, jak byl navržen prof. Janáčkem, vyhovuje řešenému problému více. Dokáže totiž minimalizovat časové ztráty cestujících, ovšem nezabezpečuje rovnoměrnost rozmístění spojů v čase, nezohledňuje také uzavřenost provozního režimu linky ani nijak nezohledňuje oběhy vozidel na linkách (ovšem v původním modelu dodržování oběhů a dalších provozních parametrů vyžadováno nebylo). Z uvedených důvodů bude za základ modelu použit model prof. Janáčka, který bude určitým způsobem modifikován tak, aby předpoklady definované v řešené úloze byly při řešení dodrženy.

Ovšem před vlastní koncepcí modifikovaného modelu bude ještě pozornost věnována výskytu řešeného typu úloh v podmínkách reálného provozu. Je to především z toho důvodu, aby se zjistilo, do jaké míry je řešená úlohy frekventovaná v praxi, tzn. jaký je aplikační potenciál připravované modifikace původního modelu prof. Janáčka.

3. Výskyt situací vyžadujících sestavení modelu časové koordinace na definované bázi

Primární motivací pro řešení daného typu problému byla optimalizace časových poloh spojů na sezónní lince 910100 spojující město Ostrava s ostravským letištěm nacházejícím se v Mošnově. Studium obslužnosti jednotlivých veřejných mezinárodních letišť s podobným provozem, jaký se vyskytuje na ostravském letišti, bylo zjištěno, že podobné linky jsou v provozu i v jiných lokalitách. Kromě toho bylo také zjištěno, že analogické typy koordinačních problémů se nemusí vztahovat pouze k dopravní obslužnosti letišť, ale mohou se vyskytovat i v podmínkách běžných linek městské hromadné dopravy.

V kapitole 3 bude pozornost věnována charakteristice těchto systémů se zaměřením na společné rysy, které by umožnily navrhnout model v takovém tvaru, aby jeho využití bylo co nejširší.

3.1 Charakteristika linek zajišťujících dopravní obslužnost letišť

3.1.1 Charakteristika dopravního spojení zabezpečovaného linkou č. 910100 (letiště Ostrava)

Linka č. 910100 zabezpečuje provoz mezi Ostravou a letištěm Mošnov od letní sezóny 2010. Její provoz je každoročně vyhlášován (rámcově) vždy pouze na období květen až září příslušného kalendářního roku. Cílem provozu této linky je pokrytí zvýšených požadavků cestujících, kteří v období letní turistické sezóny využívají k přepravě za rekreací charterových letů vypravovaných do významných přímořských letovisek. Konečnými zastávkami linky jsou Ostrava, Poruba, vozovna a Mošnov, Airport. Na trase linky jsou pro směr Ostrava – Letiště zřízeny následující nácestné zastávky: Ostrava, Svinov, nádraží; Ostrava, Hrabůvka; Ostrava, Dubina. Pro směr z letiště jsou zřízeny následující nácestné zastávky Ostrava, Dubina, Interspar; Ostrava, Hrabůvka; Ostrava, Svinov, nádraží. Linka je v období vyhlášeného provozu provozována každý den mimo neděli a státem vyhlášené svátky v tomto období. Provozní doba linky je ve dnech provozu od 7:45 do 21:25. První spoj odjíždí z Ostravy-Poruby v 7:45 a poslední v 19:45, první spoj z letiště Ostrava odjíždí v 8:45 a poslední v 20:45. Na lince je v obou směrech dodržován pravidelný takt mezi spoji, který činí 60 minut.

Z pohledu analýzy oběhů činí doba každého spoje 40 minut, přičemž po jeho ukončení následuje vždy bezpečnostní přestávka ve výši 20 minut. Z uvedených údajů vyplývá, že doba linky [2] činí 60 minut a oběžná doba [2] činí 120 minut.

Z hlediska nasazování vozidel k obsluze naplánovaných spojů patří linka mezi linky s uzavřeným oběhovým režimem. To znamená, že počet vozidel, které linku obsluhují, je neměnný, a vozidla, která obsluhují spoje této linky, nepřejíždějí k obsluze spojů jiných linek a žádná další vozidla nevstupují do obsluhy spojů této linky z jiných linek. Obsluha spojů linka č. 910100 je zajišťována dvěma vozidly.

Jak již bylo řečeno, cílem řešené práce, je optimalizace existujícího jízdního řádu, který zajistí optimální polohu jednotlivých spojů z pohledu prostoje potenciálních uživatelů.

V předložené práci bude sice model navrhován pro optimalizaci dopravního spojení mezi městem Ostrava a letištěm v Mošnově, ovšem jak již bylo uvedeno z hlediska průzkumu širší uplatnitelnosti tohoto typu modelu, bude provedena i analýza dopravního spojení na jiná letiště s podobným charakterem provozu nacházejícím se na území ČR a Slovenska.

3.1.2 Charakteristika dopravního spojení na letiště v ČR a na Slovensku

V České republice a na Slovensku se jednotlivá letiště nacházejí buď přímo na hranici městské zástavby, nebo ve větší vzdálenosti od hranic měst. Dá se tedy předpokládat velký význam veřejné hromadné dopravy při zabezpečování jejich dopravní obslužnosti. Cestující zpravidla mají možnost využívat autobusové linky, do budoucna však není vyloučena dopravní obslužnost letišť i jinými druhy dopravy (rychlodráha apod.). Cílem řešené práce je optimalizace dopravní obslužnosti v období letní sezóny, a proto i prováděná charakteristika dopravní obslužnosti jednotlivých letišť bude zaměřena převážně na toto období.

Charakteristika bude provedena pro případy dopravní obslužnosti letišť Václava Havla v Praze, Tuřany v Brně, Milana Rastislava Štefánika v Bratislavě a Barca v Košicích.

Charakteristika dopravní obslužnosti letiště Václava Havla v Praze

Letiště Václava Havla v Praze je nejdůležitějším letištem na území ČR. Každodenně vypravuje a přijímá desítky pravidelných letů, které jsou v letní sezóně doplňovány dalšími desítkami letů charterových. Intenzitě počtu vypravovaných a přijímaných letů odpovídá i počet spojů v rámci dopravní obslužnosti. Hlavní dopravní obslužnost letiště zabezpečuje linka č. 119, která je vedena v trase Dejvická (kde je zajištěn přestup z konečné stanice metra trasy A) – Letiště Václava Havla. Kromě této linky zajišťují dopravní obslužnost letiště i další autobusové linky č. 100 a 179, které spojují Letiště Václava Havla se stanicemi, ve kterých je zajištěn přestup na metro, což dokladuje následující obrázek.



Obrázek č. 1: Návaznost metra na linky veřejné hromadné dopravy zabezpečující dopravní obslužnost Letiště Václava Havla v Praze [6]

Z jízdního řádu linky č. 119 vyplývá, že spoje z konečných zastávek odjíždějí v 5 až 7 minutových intervalech (pracovní den – přepravní špička), 8 až 10 minutových intervalech (pracovní den – přepravní sedlo), nebo 10 minut (víkendový provoz). Tato intenzita spojů probíhá v průběhu celého kalendářního roku. Protože se jedná o poměrně vysoké počty spojů, nehrozí zde větší časové prodlevy mezi okamžiky příjezdu na letiště a začátkem odbavení před odletem nebo ukončením odbavení po přiletu a odjezdem návazného autobusového spoje. Proto se ani nedá očekávat, že by případná časová koordinace mezi spoji autobusové dopravy, odlety a přílety přinesla významnější efekty z hlediska úspory času.

Za účelem získání komplexnějšího obrazu o počtech spojů veřejné hromadné dopravy zabezpečujících obslužnost letiště je možno uvést, že kromě těchto stěžejních dopravních spojení jsou provozována i další doplňková spojení, například pravidelná autobusová linka ČD, která je vedena v trase železniční stanice Praha hlavní nádraží - Letiště Václava Havla.

V minulosti spoje městské hromadné dopravy doplňovala i speciálně provozovaná autobusová linka tehdejších Československých aerolinií vedená v trase Terminál Vltava – Letiště Ruzyně.

Charakteristika dopravní obslužnosti letiště Brno - Tuřany

Letiště Brno - Tuřany je druhým nejdůležitějším letištěm na území ČR. Letiště zabezpečuje celoroční pravidelnou mezinárodní leteckou dopravu do několika destinací, v období letní sezóny dále zabezpečuje přepravu cestujících do přímořských letovisek, z čehož vyplývá rozšíření pravidelné mezinárodní letecké dopravy o charterové lety. Hlavní dopravní obslužnost letiště zabezpečuje linka č. 76, která je vedena v trase Brno hlavní nádraží – letiště Brno Tuřany.

Tato linka má podobný provozní režim jako linka č. 910100, která zabezpečuje přepravu cestujících v Ostravě na letiště v Mošnově. Na lince č. 76 se rozlišuje letní a zimní jízdní řád.

Z jízdního řádu linky č. 76 a zjištěných skutečností vyplývá, že k nasazování vozidel k obsluze naplánovaných spojů patří linka č. 76 (stejně jako linka č. 910100) mezi linky s uzavřeným oběhovým režimem. Tedy počet vozidel, která jsou na linku nasazeny je neměnný a vozidla, která tuto linku obsluhují, nepřejíždějí k obsluze spojů jiných linek a žádná další vozidla nevstupují do obsluhy spojů této linky. Provozování této linky je zabezpečováno dvěma vozidly. Doba spoje na této lince činí 20 minut, doba pobytu na konečné zastávce Letiště Tuřany – Terminál činí 3 minuty a na konečné zastávce Hlavní nádraží činí 17 minut. Tedy doba linky ve směru Letiště Tuřany, Terminál – Hlavní nádraží je 23 minut a ve směru Hlavní nádraží – Letiště Tuřany, Terminál je 37 minut. Oběžná doba linky činí 60 minut.

Z uvedeného jízdního řádu a popisu linky lze usuzovat, že navrhovaný model by v rámci zajištění přepravy cestujících na letiště Brno mohl být použit jak v období letní, tak i v období zimní sezóny.

Charakteristika dopravní obslužnosti letiště Milana Rastislava Štefánika v Bratislavě

Hromadná osobní přeprava cestujících na letiště v Bratislavě je zajišťována linkami č. 61 a č. 96. Z jízdního řádu linky č. 61 vyplývá, že spoje z konečných zastávek odjíždějí v 15 až 25 minutových intervalech. Tato intenzita spojů probíhá v průběhu celého kalendářního roku. Protože i v případě dopravní obslužnosti tohoto letiště se jedná o poměrně časté spojení, nehrozí zde větší časové prodlevy mezi okamžiky příjezdů na letiště a začátky odbavení před odlety nebo ukončením odbavení po přiletech a odjezdy návazných autobusových spojů. Proto se nedá očekávat, že by případná časová koordinace mezi spoji autobusové dopravy, odlety a přílety přinesla významnější efekty z hlediska úspory času.

Charakteristika dopravní obslužnosti letiště Košice - Barca

Letiště Košice – Barca je druhým nejdůležitějším letišťem na území Slovenska. Letiště zabezpečuje celoroční pravidelnou mezinárodní leteckou dopravu. Dopravní obslužnost letiště je koncipována analogicky, jako v případě letiště Brno – Tuřany. Dopravní obslužnost letiště zabezpečuje linka č. 23, která je vedena v trase Košice, Staničné namestie - Letisko.

Z jízdního řádu linky č. 23 a zjištěných skutečností vyplývá, že spoje jsou provozovány přibližně v hodinovém intervalu. S ohledem na poměrně velký interval mezi spoji lze usuzovat, že navrhovaný model by v rámci zajištění přepravy cestujících na letiště Košice, by mohl být použit.

Z obecného popisu jednotlivých letišť lze usuzovat, že navrhovaný model by mohl najít uplatnění v podmínkách letišť, u kterých je vyžadováno pravidelné spojení veřejnou hromadnou dopravou s méně častou dopravní obslužností (interval mezi spoji odjíždějícími na a z letiště je vyšší než 30 minut) a dochází zde k nepravidelnému zatížení z pohledu odletů a příletů charterových spojů. Tento problém však není typický pouze pro obsluhu letišť, podobná situace se může vyskytnout i v městské hromadné dopravě, jak bude uvedeno v podkapitole 3.2.

3.2 Charakteristika linek s pravidelným provozem uzavřeným oběhovým režimem v podmínkách běžných linek MHD

Pro potřeby podkapitoly 4.2 budou zmíněny dva případy, které se vyskytovaly nebo ještě vyskytují v podmínkách městské hromadné dopravy v Ostravě. Prvním případem je v současnosti existující víkendový provoz na tramvajové lince číslo 5, kterou provozuje Dopravní podnik Ostrava, která zabezpečuje spojení města Ostravy s rekreační oblastí koncentrovanou v okolí významné turistické lokality Zátíší. Jako druhý případ je možno uvést autobusovou linku č. 42 téhož dopravce, která v minulosti (po dobu rekonstrukce mostů na ulici Opavská v Ostravě - Svinově) zabezpečovala spojení městského obvodu Poruba s železniční stanicí Ostrava Svinov.

Tramvajová linka č. 5 je o víkendech provozována v pravidelných 30 minutových intervalech, přičemž koordinaci je vhodné provádět na konečné zastávce Vřesinská, kde dochází k významným přestupům na linky č. 7, 8, 17 zabezpečujících spojení této lokality s nejvýznamnějšími částmi města Ostrava jako jsou Ostrava jih, Výškovice, Moravská Ostrava a Přívoz. Tramvajová linka č. 5 je obsluhována v uzavřeném oběhovém režimu dvěma soupravami. Analogii odletů a příletů letadel je možno spatřit v odjezdech a příjezdech spojů linek 7, 8 a 17.

Autobusová linka č. 42 v minulosti zabezpečovala přepravu cestujících v pravidelných 30 minutových intervalech mezi významnými lokalitami městské části Poruba a železniční stanicí Ostrava - Svinov. Autobusová linka č. 42 byla taktéž obsluhována v uzavřeném oběhovém režimu dvěma vozidly. Analogii odletů a příletů letadel je možno spatřit v odjezdech a příjezdech vlaků ze stanice Ostrava - Svinov. Od linky č. 910100 se situace lišila pouze v tom, že daná linka byla provozována jako okružní. Místo vhodné pro časovou koordinaci se nacházelo na konečné zastávce Nádraží Svinov, kde docházelo ke vzniku významných přestupních proudů mezi spoji této linky a vlakovými spoji.

3.3 Shrnutí

Na základě výše uvedených případů je možno konstatovat, že obecná úloha časové koordinace spojů linek s uzavřeným oběhovým režimem není v reálném provozu ojedinělá, ale vyskytuje se poměrně často. Z toho vyplývá, že aplikační potenciál navrženého modelu není omezen na jeden případ, ale je možné jej považovat za daleko širší.

4. Analýza zdrojů disponibilních vstupních dat pro potřeby modelu

Nežli bude přistoupeno k tvorbě matematického modelu, musí být zjištěny všechny údaje, které se v modelu nacházejí v podobě vstupů. Zdroje těchto dat existují v zásadě dva. První zdroj, ze kterého je možno čerpat, je jízdní řád, případně další provozní materiály dopravního podniku, který provozuje autobusové spojení mezi Ostravou Porubou a ostravským letištěm. Druhý zdroj informací, které je nutno získat jsou podklady o rozsahu charterové letecké dopravy, která je na ostravském letišti v letní sezóně provozována, konkrétně se jedná o seznam charterových letů a pokyny pro cestující, kteří charterové lety využívají.

V této souvislosti je možno upozornit na určitý paradox a to, že jízdní řád autobusové linky plnící tuto funkci je každoročně vydáván už k prosincové celostátní změně jízdních řádů, to znamená v období, kdy ještě nejsou známy odlety a přílety charterových letů do/z jednotlivých destinací, tj. bez vazby na letecké linky, jejichž časové polohy bývají pevně dané. To však neznamená, že problém není možné řešit. Situaci v případě „existence nepřipojů“ je možno odstranit při jarní změně celostátního jízdního řádu, tedy v období, kdy už údaje o odletech a příletech jsou zpravidla k dispozici.

Z materiálů dopravního podniku zabezpečujícího provoz na lince – Veolia Transport, a.s., jsou kromě jízdního řádu důležité tzv. oběhy vozidel (někdy také označovaných názvem „Turnusový příkaz řidiče“) zajišťujících obsluhu jednotlivých spojů. Turnusové příkazy řidičů obsahují podrobné informace nejen o obsluhovaných spojích, ale o celém průběhu pracovních směn vozidel a řidičů. V případě řešené linky je situace poměrně stabilní, protože spoje jsou vedeny v pravidelných časových polohách, přičemž všechny zbývající obslužné činnosti jsou soustředěny do pravidelných 20-ti minutových přestávek, které následují vždy po ukončení obsluhy spoje v obou konečných zastávkách.

K informacím ze strany ostravského letiště, které mají vliv na velikost časové ztráty cestujících, patří nejen informace o časových polohách plánovaných odletů a příletů, ale také o počtech spojů přilétávajících a odlétávajících v těchto polohách. Uvedené počty budou reprezentovat váhu jednotlivých časových poloh, přičemž čím větší bude počet spojů v dané poloze, tím větší váhu bude tato časová poloha vzhledem k optimalizačnímu výpočtu mít.

V letecké dopravě je velice důležitým vstupním údajem také hodnota doby odbavení cestujícího na letišti. Tato doba vyjadřující, v jakém intervalu před odletem a po příletu probíhá odbavení, se stanoví individuálně pro každé letiště v závislosti na jeho odbavovací kapacitě. Interval, ve kterém probíhá odbavení, se stanoví, na základě tzv. check - in time (času, kdy končí proces odbavení na určitý let).

Na ostravském letišti začíná odbavování cestujících pro pravidelné i charterové lety nejdříve 2 hodiny před plánovaným časem odletu, poslední možnost odbavení cestujícího v rámci charterového letu je 30 minut před jeho pravidelným odletem. Za účelem optimalizace jízdního řádu autobusové dopravy však nebude počítáno s nejzazší přípustnou hodnotou stanovenou pro odbavení (zmiňovaných 30 minut), ale s hodnotou větší. Kdyby byly příjezdy autobusových spojů navázány na 30 minut před odletem, mohlo by se stát, že by cestující po příjezdu na letiště již nebyli odbaveni, protože by se dostavili k odbavovací přepážce v okamžiku, kdy by již byl proces odbavení pro daný let ukončen. Příčiny opožděných příchodů k odbavovací přepážce mohou být různé, od možného zpoždění příjezdu autobusového spoje k letištnímu terminálu až po ryze subjektivní, kdy je pozdní příchod cestujícího zaviněn jím samým. Je dále zřejmé, že při takto vytvořené těsné časové vazbě by cestující vzhledem k výše uvedeným příčinám pozdního příchodu k odbavovací přepážce opět mohli ztratit o využití veřejné hromadné dopravy na letiště zájem a volili by náhradní způsob přepravy. Po konzultaci s odpovědnými pracovníky ostravského letiště je v modelu pracováno s předpokladem, že doba příchodu cestujícího k odbavovací přepážce činí v „optimálním“ případě 75 minut před pravidelným odletem s tím a k těmto 75 minutám se přičte ještě 10-ti minutová rezerva potřebná k přemístění cestujících z výstupní zastávky k odbavovací přepážce.

Matematickým zápisem:

$$tpres1 = Todb1 + Tpres1 \quad (4.1)$$

kde:

$tpres1$	celková přestupní doba mezi odlety charterových letů a příjezdem spoje,
$Todb1$	doba pro odbavení cestujícího, tato hodnota bude nastavena na 75 minut před časem pravidelného odletu,
$Tpres1$	doba pro přesun cestujícího mezi zastávkou a odbavovacím terminálem, tato hodnota bude nastavena na 10 minut.

V případě příletů byla po konzultaci s odpovědnými pracovníky letiště stanovena doba potřebná pro odbavení ve výši 30 minut od okamžiku pravidelného příletu, ke které se, analogicky jako v předchozím případě, přičetlo 10 minut potřebných k přemístění od odbavovací přepážky v letištní hale až na nástupní zastávku autobusového spoje.

Matematickým zápisem:

$$tpres2 = Todb2 + tpres2 \quad (4.2)$$

kde:

$tpres2$	celková přestupní doba mezi příletem charterového letu a odjezdem autobusového spoje,
$Todb2$	doba pro odbavení cestujícího, tato hodnota bude nastavena na 30 minut po času pravidelného příletu,
$Tpres2$	doba pro přesun cestujícího mezi odbavovací přepážkou a stanovištěm odjíždějícího autobusového spoje, tato hodnota bude nastavena na 10 minut po ukončení procesu odbavení po čase pravidelného příletu.

V další kapitole již bude přistoupeno k návrhu samotného modelu, který umožní optimalizaci jízdního řádu na lince č. 910100. Využití v dalších případech je možné po zpracování specifik jednotlivých linek.

5. Návrh modelů pro optimalizaci jízdního řádu

V této kapitole předložené práce bude navrhnut model pro optimalizaci jízdního řádu uzavřené linky č. 910100. Tento matematický model bude umožňovat optimalizaci časových poloh jednotlivých spojů autobusové linky č. 910100 v závislosti na odletech a příletech jednotlivých charterových letů a stanovených přestupních dobách.

K základním cílům řešené úlohy patří nutnost zkoordinovat dva na sobě nezávislé dopravní systémy, z nichž jeden probíhá v tzv. uzavřeném provozním režimu.

Skutečnost, že provoz na autobusové lince probíhá v pravidelném uzavřeném režimu je z hlediska atraktivity přepravní nabídky výhodou, z hlediska modelování však situaci do jisté míry komplikuje, neboť je nutno zachovávat mezi spoji pravidelné odstupy. Odstranění požadavku na pravidelné intervaly mezi spoji by mělo za následek, že cestující by v případě některých přestupů sice nemuseli tak dlouho čekat jako při pravidelných odjezdech, mohlo by se však stát, že by při nepravidelných odjezdech nebylo možno obsluhu uvedených spojů zajistit stávajícím počtem vozidel (vlivem možných shluků spojů v čase by stávající počet vozidel nebyl schopen tyto spoje obsloužit).

Optimalizace se v řešené úloze neprovádí jednorázově, tzn. pro jednu konkrétní situaci, která se do budoucna již nebude opakovat (např. 1 den), ale provádí se v rámci delšího časového období, pro které je charakteristické periodické opakování koordinovaných procesů. V rámci řešeného období platí, že váha některých koordinovaných procesů je významnější než procesů ostatních. Tuto skutečnost je nutno také v modelu ošetřit.

5.1 Návrh modelu v obecném tvaru

Formulace zadání

Je dán přestupní uzel, ve kterém má proběhnout časová koordinace mezi příjezdy a odjezdy autobusových spojů a časy příletů a odletu charterových letů, resp. vhodnými dobami před pravidelnými časy odletů a po pravidelných časech příletu. Pro každou časovou polohu odletu a příletu je stanoven počet těchto odletů a příletů za letní sezónu (dobu platnosti jízdního řádu pro řešenou linku).

Dále je u každého spoje, který zajišťuje přepravu cestujících k odletům a od příletů, známa výchozí časová poloha, je definována doba spoje, která činí 40 minut v obou směrech a doba linky, která činí 60 minut v obou směrech (z uvedeného vyplývá, že obratová doba na obou konečných zastávkách činí 20 minut). Je požadováno, aby spoje přijížděly a odjížděly v pravidelných časových intervalech. Úkolem je rozhodnout o časovém posunu celé soustavy spojů (v důsledku požadavku na pravidelnost dopravního spojení musí být se všemi spoji proveden stejný časový posun) tak, aby se minimalizovaly časové ztráty cestujících, kteří budou dané spoje využívat (bude rozvedeno v komentáři k modelu). Maximální dovolený posun jednotlivých spojů může činit vzhledem ke stanovenému taktu uplatňovanému na lince 59 minut.

Vstupní údaje

Označení množin použitých v modelu:

I	množina autobusových spojů přijíždějících na letiště z Ostravy,
J	množina časových poloh odletů (charterových letů) z letiště Ostrava,
K	množina autobusových spojů odjíždějících z letiště Ostrava,
L	množina časových poloh příletů (charterových letů) na letiště.

Označení konstant použitých v modelu:

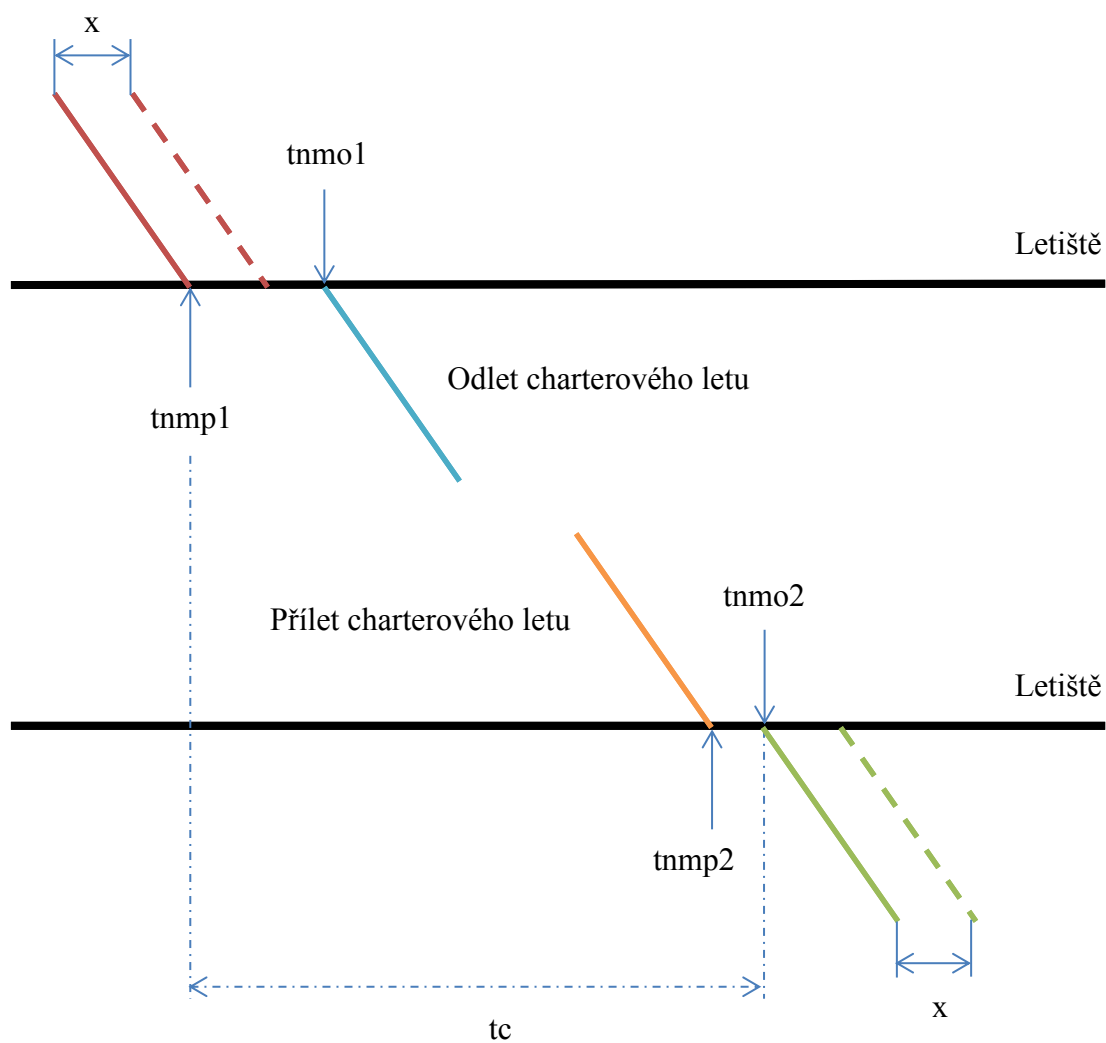
$tpres1$	přestupní doba mezi výstupní zastávkou autobusového spoje a odbavovací přepážkou letištního terminálu (přestupní doba před odletem),
$tpres2$	přestupní doba mezi odbavovací přepážkou letištního terminálu a nástupní zastávkou autobusového spoje (přestupní doba po příletu),
A_l	počet příletů za sezónu v časové poloze $l \in L$,
B_j	počet odletů za sezónu v časové poloze $j \in J$,
$tnmp1_i$	nejdříve možný okamžik příjezdu autobusového spoje $i \in I$ na letiště Ostrava,
$tnmo1_j$	nejdříve možný okamžik odletu $j \in J$,
$tnmo2_k$	nejdříve možný okamžik odjezdu autobusového spoje $k \in K$ z letiště Ostrava,
$tnmp2_l$	nejdříve možný okamžik příletu $l \in L$,
N	maximální dovolený posunů pro spoje $i \in I$ a $j \in J$
ts	doba spoje pro každý směr,
tc	obratová doba na konečné zastávce.

Proměnné vstupující do modelu

h_j	časová ztráta cestujících, kteří přijeli na letiště autobusovým spojem před odletem $j \in J$
q_l	časová ztráta cestujících, kteří odjíždějí z letiště autobusovým spojem po příletu $l \in L$
$z_{i,j}$	proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi okamžikem příjezdu autobusového spoje $i \in I$ a vhodným okamžikem začátku odbavení pro spoje odlétající v časové poloze $j \in J$
$m_{k,l}$	proměnná modelující vznik přestupní vazby mezi vhodným okamžikem ukončení odbavení po příletu v časové poloze $l \in L$ a odjezdem navazujícího přípojného autobusového spoje umístěného do časové polohy $k \in K$
x	časový posun soustavy autobusových spojů vztažmo k nejdříve možné časové poloze

Celý proces koordinace je možno schematicky znázornit následujícím obrázkem.

Příjezd spoje VHD ze směru Ostrava, Poruba



Odjezd spoje VHD ve směru Ostrava, Poruba

Obrázek č. 2: Schématický proces koordinace [Autor]

Matematický model řešení úlohy bude mít tvar:

$$\min f(z, m, x, h, q) = \sum_{j \in J} B_j h_j + \sum_{l \in L} A_l q_l \quad (5.1)$$

za podmínek:

$$tnmo1_j - (tnmp1_i + x) - tpres1_j \geq T(z_{i,j} - 1) \quad \text{pro } i \in I, j \in J \quad (5.2)$$

$$tnmo1_j - (tnmp1_i + x) - tpres1_j \leq h_j + T(1 - z_{i,j}) \quad \text{pro } i \in I, j \in J \quad (5.3)$$

$$(tnmo2_k + x) - tnmp2_l - tpres2_l \geq T(m_{k,l} - 1) \quad \text{pro } k \in K, l \in L \quad (5.4)$$

$$(tnmo2_k + x) - tnmp2_l - tpres2_l \leq q_l + T(1 - m_{k,l}) \quad \text{pro } k \in K, l \in L \quad (5.5)$$

$$\sum_{i \in I} z_{i,j} = 1 \quad \text{pro } j \in J \quad (5.6)$$

$$\sum_{k \in K} m_{k,l} = 1 \quad \text{pro } l \in L \quad (5.7)$$

$$x \leq N \quad (5.8)$$

$$z_{i,j} \in \{0,1\} \quad \text{pro } i \in I, j \in J \quad (5.9)$$

$$m_{k,l} \in \{0,1\} \quad \text{pro } k \in K, l \in L \quad (5.10)$$

$$x \geq 0 \quad (5.11)$$

$$h_j \geq 0 \quad \text{pro } j \in J \quad (5.12)$$

$$q_l \geq 0 \quad \text{pro } l \in L \quad (5.13)$$

Funkce (5.1) vyjadřuje optimalizační kritérium, které se skládá ze dvou složek. První složku tvoří celková doba mezi okamžiky příchodů cestujících, kteří použili autobusovou dopravu k odbavovacím přepážkám a časovými okamžiky „optimálními“ z pohledu realizace procesu odbavení. Druhou složku tvoří celková doba mezi očekávanými okamžiky ukončení procesu odbavení po příletu včetně přesunu na nástupní zastávku autobusové dopravy a časovými okamžiky odjezdů navazujících autobusových spojů.

Skupina podmínek (5.2) a (5.3) plní funkci podmínek (2.13) a (2.14) v původním modelu prof. Janáčka a je sestavena pro přestupy před odletem a po příletu. Skupina podmínek (5.4) a (5.5) plní funkci podmínek (2.13) a (2.14) v původním modelu prof. Janáčka a je sestavena pro přestupy po příletu.

Skupiny omezujících podmínek (5.6) a (5.7) zajišťují vznik přestupních vazeb mezi příjezdy autobusů a odlety (5.6) a přílety a odjezdy autobusových spojů (5.7). Konkrétně, aby před každým odletem přijel na letiště právě jeden autobusový spoj a od každého příletu byl vypraven právě jeden odjíždějící spoj (to vše při zohlednění provozní doby linky).

Omezující podmínka (5.8) zajistí, že posun soustavy příjíždějících a odjíždějících spojů se uskuteční v povolených mezích.

Skupiny omezujících podmínek (5.9), (5.10), (5.11), (5.12) a (5.13) vyjadřují definiční obory proměnných v řešené úloze.

Jedna z výše uvedených nevýhod prof. Janáčka byla, že nedostatečně zohledňoval podmínky linek s uzavřeným provozním režimem a požadovanými pravidelnými rozestupy mezi spoji. Při konkrétní počítačové realizaci bude akceptace těchto předpokladů zohledněna přímo ve vstupních údajích a to tak, že všechny nejdříve možné časové polohy spojů budou pevně fixovány ve vzdálenosti odpovídající velikosti taktu uplatňovanému na lince tj. o interval 60 minut. V modelu bude vystupovat jednotný časový posun o velikosti x tzn., dojde-li k nařízení určitého posunu ve výši x budou o stejnou hodnotu posunuty všechny spoje na dané lince. Stejným způsobem bude zohledněno zachování taktu i v opačném směru a vytvořena vazba mezi časy odjezdů z konečných zastávek, tak aby byl zachován jejich časový odstup podle v současnosti platného jízdního řádu.

5.2 Text programu navrženého modelu v programu Xpress – IVE

V této podkapitole bude věnována pozornost transformaci matematického modelu do textu programu, který využívá optimalizační software Xpress-IVE. Text programu je možno formálně rozdělit do tří částí - v první části probíhá deklarace vstupních veličin a proměnných, druhou část tvoří zadání konkrétních hodnot konstant, zápis soustavy omezujících podmínek a účelové funkce a cílem poslední části je uvedení požadavků na výpis výsledků optimalizačního výpočtu.

$$prilet=1..30$$
$$odlet=1..28$$
$$odjspoj=1..13$$
$$prjspoj=1..13$$

Pomocí zde uvedeného zápisu, je deklarováno, že model bude pracovat s časovými údaji o 30 přiletech, 28 odletech, 13 odjezdech autobusových spojů a 13 příjezdech autobusových spojů.

$$tprest1:array(odlet)of real$$
$$tprest2:array(prilet)of real$$

Jedná se o deklaraci konstant - přestupních dob, přičemž pro jednotlivé příjezdy/odlety a přilety/odjezdy jsou tyto hodnoty stanoveny jednotlivě (formou pole).

$$tnmp1:array(prjspoj)of real$$
$$tnmo2:array(odjspoj)of real$$

Těmito zápisy deklarujeme, že nejdříve možné příjezdy a nejdříve možné odjezdy autobusových spojů jsou konstanty.

$$tnmo1:array(odlet)of real$$
$$tnmp2:array(prilet)of real$$

Těmito zápisy deklarujeme, že časy přiletů a odletů jsou konstanty.

$$h:\text{array}(\text{odlet})\text{of mpvar}$$
$$q:\text{array}(\text{prilet})\text{of mpvar}$$

Pomocí těchto zápisů jsou deklarovány proměnné představující časovou ztrátu vzniklou při vzniku přestupních vazeb.

$$z:\text{array}(\text{prjspoj},\text{odlet})\text{of mpvar}$$
$$m:\text{array}(\text{odjspoj},\text{prilet})\text{of mpvar}$$

Pomocí těchto zápisů jsou deklarovány proměnné, jejichž cílem je zajistit přiřazení právě jednoho přijíždějícího spoje ke každému odletu a právě jednoho odjíždějícího spoje ke každému příletu.

$$B:\text{array}(\text{odlet})\text{of real}$$
$$A:\text{array}(\text{prilet})\text{of real}$$

Pomocí těchto zápisů jsou definovány konstanty, které představují četnost letů v jednotlivých časových polohách.

$$x:\text{mpvar}$$

Pomocí tohoto zápisu je deklarována proměnná, představující posun soustavy autobusových spojů v čase.

$$\text{toova}:\text{array}(\text{odjspoj})\text{of real}$$

Pomocí tohoto zápisu je deklarována konstantní hodnota času odjezdu prvního spoje z Ostravy-Poruby.

Část 2 Zadání konkrétních hodnot, sestavení omezujících podmínek a tvorba účelové funkce

Zadání konstant, které nejsou typu pole:

$$T:=1000$$

Tímto zápisem je definována prohibitivní konstanta, která slouží jako pomocná hodnota při výpočtu.

$$ts:=40$$

Tímto zápisem je definována hodnota doby jízdy spoje mezi zastávkami Ostrava - Poruba, vozovna a Mošnov, Airport.

$$tc:=20$$

Tímto zápisem je definována hodnota, jejíž hodnota reprezentuje obratovou dobu na zastávce Mošnov, Airport.

$$toova(1):=45$$

Tímto zápisem je deklarována hodnota odjezdu prvního spoje ze zastávky Ostrava - Poruba, vozovna vztažená ke zvolenému bodu 0, který byl stanoven v 7:00.

$$takt:=60$$

Tímto zápisem je definována hodnota taktu, který je nařízen na lince č. 910100.

Zadání konstant, které jsou typu pole:

[illegible]

Tímto zápisem jsou definovány hodnoty přestupních dob mezi příjezdy jednotlivých spojů na zastávku Mošnov, Airport a odlety charterových letů.

[illegible]

Tímto zápisem jsou definovány hodnoty přestupních dob mezi přilety charterových letů a odjezdy autobusových spojů ze zastávky Mošnov, Airport.

$$tnmpl::[85,145,205,265,325,385,445,505,565,625,685,745,805]$$

Tímto zápisem jsou definovány časy nejdříve možných příjezdů jednotlivých spojů na zastávku Mošnov, Airport od zvoleného bodu 0.

$$tnmo2::[105,165,225,285,345,405,465,525,585,645,705,765,825]$$

Tímto zápisem jsou definovány časy nejdříve možných odjezdů jednotlivých spojů ze zastávky Mošnov, Airport od zvoleného bodu 0.

$$tnmol::[195,230,250,275,280,310,320,325,330,355,380,385,480,510,515,555,565,575,600,660,680,700,710,720,740,750,820,850]$$

Tímto zápisem jsou definovány časové polohy odletů charterových letů od zvoleného bodu 0.

$tnmp2::[135,150,170,180,190,230,235,240,255,270,315,320,345,420,455,465,495,505,515$
 $,530,570,595,600,630,650,660,670,705,760,770]$

Tímto zápisem jsou definovány časové polohy příletů charterových letů od zvoleného bodu 0.

$B::[18,15,3,9,22,10,39,15,11,11,11,16,17,14,15,32,9,5,15,10,11,11,49,34,12,9,11,12]$

Pomocí tohoto zápisu jsou definovány četnosti odletů v jednotlivých časových polohách v období provozu autobusové linky.

$A::[18,1,1,15,3,22,9,22,11,68,11,11,16,17,14,14,$

$11,29,5,13,15,10,16,11,24,11,15,21,11,11]$

Pomocí tohoto zápisu jsou definovány četnosti příletů v jednotlivých časových polohách v období provozu autobusové linky.

$forall(i \text{ in } prjspoj, j \text{ in } odlet) z(i, j) \text{ is_binary}$

$forall(k \text{ in } odjspoj, l \text{ in } prilet) m(k, l) \text{ is_binary}$

Pomocí těchto dvou skupin podmínek deklarujeme, že proměnné z_{ij} a m_{kl} budou bivalentní proměnné.

$forall(i \text{ in } prjspoj, j \text{ in } odlet) (tnmo1(j)) - (tnmp1(i) + x) - tpres1(j) \geq T^*(z(i, j) - 1)$

$forall(i \text{ in } prjspoj, j \text{ in } odlet) (tnmo1(j)) - (tnmp1(i) + x) - tpres1(j) \leq h(j) + T^*(1 - z(i, j))$

Tyto dvě skupiny omezujících podmínek slouží k tomu, aby byly vytvořeny vhodné vazby mezi jednotlivými příjíždějícími spoji a odlety pouze v případě, že je to časově možné a v takové kombinaci, která je z hlediska účelové funkce optimální.

$$\text{forall}(k \text{ in } \text{odjspoj}, l \text{ in } \text{prilet})(\text{tnmo2}(k)+x)-(\text{tnmp2}(l))-\text{tprest2}(l) \geq T^*(m(k,l)-1)$$

$$\text{forall}(k \text{ in } \text{odjspoj}, l \text{ in } \text{prilet})(\text{tnmo2}(k)+x)-(\text{tnmp2}(l))-\text{tprest2}(l) \leq q(l)+T^*(1-m(k,l))$$

Tyto dvě skupiny omezujících podmínek slouží k tomu, aby byly vytvořeny vhodné vazby mezi přílety a jednotlivými odjíždějícími spoji pouze v případě, že je to časově možné a v takové kombinaci, která je z hlediska účelové funkce optimální.

$$x \leq 59$$

Tato omezující podmínka zajišťuje, že časový posun jednotlivých spojů nepřesáhne maximální dovolený časový posun.

$$\text{minimalni_casova_ztrata} := \text{sum}(j \text{ in } \text{odlet})B(j)*h(j) + \text{sum}(l \text{ in } \text{prilet})A(l)*q(l)$$

Jedná se o zápis účelové funkce.

$$\text{minimize}(\text{minimalni_casova_ztrata})$$

Zápis, zajišťující, že hodnota účelové funkce bude minimalizována.

Část 3 Výpis výsledků optimalizačního výpočtu

$$\text{writeln}(\text{"minimalni casova ztrata je: "}, \text{getobjval}, \text{" min"})$$

Tento zápis zajistí výpis hodnoty účelové funkce.

$$forall(j \text{ in } odlet | getsol(h(j)) > 0) writeln("h(", j, ") = ", getsol(h(j)))$$

Tento zápis zajistí výpis hodnot časových ztrát, které vzniknou po optimalizaci v relacích příjezd – odlet.

$$forall(l \text{ in } prilet | getsol(q(l)) > 0) writeln("q(", l, ") = ", getsol(q(l)))$$

Tento zápis zajistí výpis hodnot časových ztrát, které vzniknou po optimalizaci v relacích přilet – odjezd.

$$writeln("x = ", getsol(x))$$

Tento zápis zajistí výpis hodnoty časového posunu všech spojů.

$$forall(i \text{ in } prjspoj) writeln("prijezd spoje ", i, " bude ", getsol(toova(1) + (i-1)*takt + x + ts))$$

Tento zápis zajistí výpis doby příjezdu všech spojů na zastávku Mošnov, Airport.

$$forall(k \text{ in } odjspoj) writeln("odjezd spoje ", k, " bude ", getsol(toova(1) + ts + tc + (k-1)*takt + x))$$

Tento zápis zajistí výpis doby odjezdů všech spojů ze zastávky Mošnov, Airport.

$$forall(i \text{ in } prjspoj, j \text{ in } odlet | getsol(z(i,j)) = 1) writeln("z(", i, ", ", j, ") = ", getsol(z(i,j)))$$

Tento zápis zajistí výpis vzniklých přestupních vazeb v relacích příjezd – odlet.

$$forall(l \text{ in } prilet, k \text{ in } odjspoj | getsol(m(k,l)) = 1) writeln("m(", k, ", ", l, ") = ", getsol(m(k,l)))$$

Tento zápis zajistí výpis vzniklých přestupních vazeb v relacích přilet – odjezd.

6. Výpočetní experimenty s navrženým modelem v podmínkách řešené úlohy

V předchozí kapitole byl vytvořen obecný model pro časovou koordinaci spojů a byly formulovány stěžejní části textu programu, prostřednictvím kterého bude v optimalizačním software realizován optimalizační výpočet. V kapitole č. 6 budou provedeny výpočetní experimenty s navrhnutým modelem v podmínkách konkrétní úlohy. Výpočetní experimenty budou prováděny za účelem praktického ověření správnosti navrženého modelu a ověření jeho použitelnosti pro reálné situace.

6.1 Charakteristika konkrétního problému

Pro experimenty v této kapitole byla zvolena návaznost autobusových spojů, které zabezpečují přepravu cestujících mezi Ostravou Porubou a letištěm Mošnov, na charterové lety. Tuto přepravu cestujících zabezpečuje linka č. 910100, která je provozována v uzavřeném režimu a její charakteristika již byla popsána v podkapitole 3.1.1.

6.2 Příprava vstupních dat

V této přípravné fázi je nutné z disponibilních zdrojů získat potřebná vstupní data, která budou v modelu použita. V kapitole „Analýza disponibilních zdrojů vstupních dat“ byly uvedeny zdroje, ze kterých byla vstupní data čerpána. Cílem této fáze je z těchto zdrojů potřebná vstupní data získat a „očistit je“ od dat, která nejsou pro model potřebná, popř., jejichž charakter by mohl narušit správné fungování modelu. Jak již bylo v předešlé kapitole zmíněno, zdroje těchto dat jsou následující – platný jízdní řád linky č. 910100, oběhy vozidel pro tuto linku a platný seznam charterových letů pro tuto sezónu. Pro optimalizaci je sice zvolen výchozí čas 7:00 (bod 0), ovšem nejdříve možná poloha prvního odjezdu autobusového spoje z Ostravy, na kterém závisejí všechny zbývající odjezdy, je v 7:45, tzn., nepočítá se s možností posunu spojů před tuto dobu.

V tabulkách č. 1 a 2 jsou uvedeny vstupní údaje nejdříve možných příjezdů a odjezdů autobusových spojů.

V tabulkách č. 4 a 5 jsou uvedeny vstupní údaje týkajících se příletů a odletů charterových letů.

Jsou zde pro úplnost uvedeny všechny časové polohy odletů a příletů, tedy i ty, které se nacházejí mimo dobu, kdy přichází v úvahu návoz a odvoz cestujících na/z letiště autobusovou linkou, jejíž jízdní řád se optimalizuje.

Pořadí spoje (i)	Poloha nejdříve možného příjezdu spoje i vztahená k bodu 0 (7:00)	Data použitá pro koordinaci
1.	85	
2.	145	
3.	205	
4.	265	
5.	325	
6.	385	
7.	445	
8.	505	
9.	565	
10.	625	
11.	685	
12.	745	
13.	805	

Tabulka č. 1 Vstupní údaje nejdříve možných příjezdů na letiště [autor]

Pořadí spoje (k)	Poloha nejdříve možného odjezdu spoje k vztahená k bodu 0 (7:00)	Data použitá pro koordinaci
1.	105	
2.	165	
3.	225	
4.	285	
5.	345	
6.	405	
7.	465	
8.	525	
9.	585	
10.	645	
11.	705	
12.	765	
13.	825	

Tabulka č. 2 Vstupní údaje nejdříve možných odjezdů z letiště [Autor]

Pořadí	Časová poloha odletu [h:min]	Počet odletů za sledované období v dané časové poloze B _j [-]	Časové polohy odletů charterových letů vztažené k bodu 0 (7:00)	
1.	3:40	23	-	-
2.	5:00	68	-	-
3.	6:30	11	-	-
4.	10:15	18	195	Časy odletů použité při koordinaci
5.	10:50	15	230	
6.	11:10	3	250	
7.	11:35	9	275	
8.	11:40	22	280	
9.	12:10	10	310	
10.	12:20	39	320	
11.	12:25	15	325	
12.	12:30	11	330	
13.	12:55	11	355	
14.	13:20	11	380	
15.	13:25	16	385	
16.	15:00	17	480	
17.	15:30	14	510	
18.	15:35	15	515	
19.	16:15	32	555	
20.	16:25	9	565	
21.	16:35	5	575	
22.	17:00	15	600	
23.	18:00	10	660	
24.	18:20	11	680	
25.	18:40	11	700	
26.	18:50	49	710	
27.	19:00	34	720	
28.	19:20	12	740	
29.	19:30	9	750	
30.	20:40	11	820	
31.	21:10	12	850	
32.	23:30	17	-	-
Celkový počet odletů za sledované období		565	-	-

Tabulka č. 3 Vstupní údaje o odletech charterových letů [Autor]

Pořadí	Časová poloha příletu [h:min]	Počet příletů za sledované období v dané časové poloze A _i [-]	Časové polohy příletů charterových letů vztahené k bodu 0 (7:00)	
1.	0:50	34	-	-
2.	1:00	18	-	-
3.	9:15	18	135	Časy příletů použité pro koordinaci
4.	9:30	1	150	
5.	9:50	1	170	
6.	10:00	15	180	
7.	10:10	3	190	
8.	10:50	22	230	
9.	10:55	9	235	
10.	11:00	22	240	
11.	11:15	11	255	
12.	11:30	68	270	
13.	12:15	11	315	
14.	12:20	11	320	
15.	12:45	16	345	
16.	14:00	17	420	
17.	14:35	14	455	
18.	14:45	14	465	
19.	15:15	11	495	
20.	15:25	29	505	
21.	15:35	5	515	
22.	15:50	13	530	
23.	16:30	15	570	
24.	16:55	10	595	
25.	17:00	16	600	
26.	17:30	11	630	
27.	17:50	24	650	
28.	18:00	11	660	
29.	18:10	15	670	
30.	18:45	21	705	
31.	19:40	11	760	
32.	19:50	11	770	
33.	20:25	12	-	-
34.	22:35	10	-	-
35.	22:40	17	-	-
Celkový počet příletů za sledované období		547	-	-

Tabulka č. 4 Vstupní údaje příletů charterových letů [Autor]

6.3 Matematický model řešené úlohy s konkrétními hodnotami

V této části práce budou do navrženého modelu dosazeny konkrétní hodnoty. Protože se jedná o značně rozsáhlý model, bude uveden pouze jeho fragment. V rámci jednotlivých skupin podmínek bude uvedena vždy první a poslední podmínka ve skupině.

Matematický model řešené úlohy bude mít tvar:

$$\min f(x, m, z, h, q) = 18h_1 + \dots + 12h_{28} + 18q_1 + \dots + 12q_{30}$$

Za podmínek:

$$z_{1,1} + \dots + z_{13,1} = 1$$

.

.

.

$$z_{1,28} + \dots + z_{13,28} = 1$$

$$m_{1,1} + \dots + m_{13,1} = 1$$

.

.

.

$$m_{1,30} + \dots + m_{13,30} = 1$$

$$195 - (85 + x) - 85 \geq 1000(z_{1,1} - 1)$$

.

.

.

$$850 - (805 + x) - 805 \geq 1000(z_{13,28} - 1)$$

$$195 - (85 + x) - 85 \leq h_1 + 1000(1 - z_{1,1})$$

.

.

.

$$850 - (85 + x) - 805 \leq h_{28} + 1000(1 - z_{13,28})$$

$$(105 + x) - 135 - 40 \geq 1000(m_{1,1} - 1)$$

.

.

.

$$(825 + x) - 770 - 40 \geq 1000(m_{13,30} - 1)$$

$$(105 + x) - 135 - 40 \leq q_1 + 1000(1 - m_{1,1})$$

.

.

.

$$(825 + x) - 770 - 40 \leq q_{30} + 1000(1 - m_{13,30})$$

$$x \leq 59$$

$$z_{1,1} \in \{0,1\}$$

.

.

.

$$z_{13,28} \in \{0,1\}$$

$$m_{1,1} \in \{0,1\}$$

.

.

.

$$m_{13,30} \in \{0,1\}$$

$$x \geq 0$$

$$h_1 \geq 0$$

.

.

.

$$h_{28} \geq 0$$

$$q_1 \geq 0$$

.

.

.

$$q_{30} \geq 0$$

7. Zhodnocení dosažených výsledků

V této části diplomové práce bude věnována pozornost konečnému zpracování výstupů z řešeného matematického modelu. Zpracování výstupů bude provedeno tabelárně.

Měřítkem kvality dosaženého řešení bude rozdíl mezi hodnotou účelové funkce navrženého řešení a hodnotou účelové funkce vypočítanou pro současný stav. Je však nutno podotknout, že vypočítané hodnoty účelových funkcí jak pro stav současný, tak i pro stav vypočítaný, udává časovou ztrátu pro sledované období, která se nevztahuje k cestujícím, jelikož počet cestujících využívajících linku č. 910100 je proměnlivý a pro tuto sezónu v podstatě neznámý. Pokud by ovšem byl stanoven průměrný počet cestujících, kteří využívají jednotlivé spoje, bylo by možno navrhnutý model upravit do takového tvaru, ve kterém by jeho výsledná hodnota ke ztrátovým/ziskovým osobo/minutám. Pro současné řešení je možno hodnotu účelové funkce získat také pomocí výpočtu v programu Xpress – IVE za předpokladu, že nebude umožněn posun autobusových spojů.

V tabulkách č. 5 a 6 jsou uvedeny výsledné údaje časových ztrát a návaznosti spojů.

V tabulkách č. 7 a č. 8 jsou uvedeny časové posuny odjíždějících a přijíždějících autobusových spojů na/z ostravského letiště.

V tabulce č. 9 je uveden rozdíl časových ztrát mezi současným stavem a vypočteným stavem.

V tabulkách č. 10 a 11 je uveden původní jízdní řád a nově navržený jízdní řád linky 910100 ve směru Ostrava → Mošnov.

V tabulkách č. 12 a 13 je uveden původní jízdní řád a nově navržený jízdní řád linky 910100 ve směru Mošnov → Ostrava.

	Hodnoty dosažené z původního řešení (bez posunu)		Hodnoty dosažené použitím modelu (s posunem)	
Pořadí (j)	Časová ztráta plynoucí z odletů navázaných na jednotlivé příjezdy autobusů (h_i [min.])	Navázání odletů na jednotlivé příjezdy autobusů $z_{i,j}$ (i - přijíždějící spoj, j - odlet)	Časová ztráta plynoucí z odletů navázaných na jednotlivé příjezdy autobusů (h_i [min.])	Navázání odletů na jednotlivé příjezdy autobusů $z_{i,j}$ (i - přijíždějící spoj, j - odlet)
1.	$h(1)=25$	$z(1,1)=1$	$h(1)=0$	$z(1,1)=1$
2.	$h(2)=0$	$z(2,2)=1$	$h(2)=35$	$z(1,2)=1$
3.	$h(3)=20$	$z(2,3)=1$	$h(3)=55$	$z(1,3)=1$
4.	$h(4)=45$	$z(2,4)=1$	$h(4)=20$	$z(2,4)=1$
5.	$h(5)=50$	$z(2,5)=1$	$h(5)=25$	$z(2,5)=1$
6.	$h(6)=20$	$z(3,6)=1$	$h(6)=55$	$z(2,6)=1$
7.	$h(7)=30$	$z(3,7)=1$	$h(7)=5$	$z(3,7)=1$
8.	$h(8)=35$	$z(3,8)=1$	$h(8)=10$	$z(3,8)=1$
9.	$h(9)=40$	$z(3,9)=1$	$h(9)=15$	$z(3,9)=1$
10.	$h(10)=5$	$z(4,10)=1$	$h(10)=40$	$z(3,10)=1$
11.	$h(11)=30$	$z(4,11)=1$	$h(11)=5$	$z(4,11)=1$
12.	$h(12)=35$	$z(4,12)=1$	$h(12)=10$	$z(4,12)=1$
13.	$h(13)=10$	$z(6,13)=1$	$h(13)=45$	$z(5,13)=1$
14.	$h(14)=40$	$z(6,14)=1$	$h(14)=15$	$z(6,14)=1$
15.	$h(15)=45$	$z(6,15)=1$	$h(15)=20$	$z(6,15)=1$
16.	$h(16)=25$	$z(7,16)=1$	$h(16)=0$	$z(7,16)=1$
17.	$h(17)=35$	$z(7,17)=1$	$h(17)=10$	$z(7,17)=1$
18.	$h(18)=45$	$z(7,18)=1$	$h(18)=20$	$z(7,18)=1$
19.	$h(19)=10$	$z(8,19)=1$	$h(19)=45$	$z(7,19)=1$
20.	$h(20)=10$	$z(9,20)=1$	$h(20)=45$	$z(8,20)=1$
21.	$h(21)=30$	$z(9,21)=1$	$h(21)=5$	$z(9,21)=1$
22.	$h(22)=50$	$z(9,22)=1$	$h(22)=25$	$z(9,22)=1$
23.	$h(23)=0$	$z(10,23)=1$	$h(23)=35$	$z(9,23)=1$
24.	$h(24)=10$	$z(10,24)=1$	$h(24)=45$	$z(9,24)=1$
25.	$h(25)=30$	$z(10,25)=1$	$h(25)=5$	$z(10,25)=1$
26.	$h(26)=40$	$z(10,26)=1$	$h(26)=15$	$z(10,26)=1$
27.	$h(27)=50$	$z(11,27)=1$	$h(27)=25$	$z(11,27)=1$
28.	$h(28)=20$	$z(12,28)=1$	$h(28)=55$	$z(11,28)=1$
Σ	785	-	685	-

Tabulka č. 5 Výsledné hodnoty časových ztrát a návaznosti jednotlivých spojů
pro odlety a příjezdy autobusů [Autor]

	Hodnoty dosažené z původního řešení (bez posunu)		Hodnoty dosažené použitím modelu (s posunem)	
Pořadí (l)	Časová ztráta plynoucí z příletů navázaných na jednotlivé příjezdy autobusů (q_l [min.])	Navázání příletů na jednotlivé příjezdy autobusů $m_{k,l}$ (k - odjíždějící spoj, l - přílet)	Časová ztráta plynoucí z příletů navázaných na jednotlivé odjezdy autobusů (q_l [min.])	Navázání příletů na jednotlivé odjezdy autobusů $m_{k,l}$ (k - odjíždějící spoj, l - přílet)
1.	$q(1)=50$	$m(3,1)=1$	$q(1)=15$	$m(2,1)=1$
2.	$q(2)=35$	$m(3,2)=1$	$q(2)=0$	$m(2,2)=1$
3.	$q(3)=15$	$m(3,3)=1$	$q(3)=40$	$m(3,3)=1$
4.	$q(4)=5$	$m(3,4)=1$	$q(4)=30$	$m(3,4)=1$
5.	$q(5)=55$	$m(4,5)=1$	$q(5)=20$	$m(3,5)=1$
6.	$q(6)=15$	$m(4,6)=1$	$q(6)=40$	$m(4,6)=1$
7.	$q(7)=10$	$m(4,7)=1$	$q(7)=35$	$m(4,7)=1$
8.	$q(8)=5$	$m(4,8)=1$	$q(8)=30$	$m(4,8)=1$
9.	$q(9)=50$	$m(5,9)=1$	$q(9)=15$	$m(4,9)=1$
10.	$q(10)=35$	$m(5,10)=1$	$q(10)=0$	$m(4,10)=1$
11.	$q(11)=50$	$m(6,11)=1$	$q(11)=15$	$m(5,11)=1$
12.	$q(12)=45$	$m(6,12)=1$	$q(12)=10$	$m(5,12)=1$
13.	$q(13)=20$	$m(6,13)=1$	$q(13)=45$	$m(6,13)=1$
14.	$q(14)=5$	$m(7,14)=1$	$q(14)=30$	$m(7,14)=1$
15.	$q(15)=30$	$m(8,15)=1$	$q(15)=55$	$m(8,15)=1$
16.	$q(16)=20$	$m(8,16)=1$	$q(16)=45$	$m(8,16)=1$
17.	$q(17)=50$	$m(9,17)=1$	$q(17)=15$	$m(8,17)=1$
18.	$q(18)=40$	$m(9,18)=1$	$q(18)=5$	$m(8,18)=1$
19.	$q(19)=30$	$m(9,19)=1$	$q(19)=55$	$m(9,19)=1$
20.	$q(20)=15$	$m(9,20)=1$	$q(20)=40$	$m(9,20)=1$
21.	$q(21)=35$	$m(10,21)=1$	$q(21)=0$	$m(9,21)=1$
22.	$q(22)=10$	$m(10,22)=1$	$q(22)=35$	$m(10,22)=1$
23.	$q(23)=5$	$m(10,23)=1$	$q(23)=30$	$m(10,23)=1$
24.	$q(24)=35$	$m(11,24)=1$	$q(24)=0$	$m(10,24)=1$
25.	$q(25)=15$	$m(11,25)=1$	$q(25)=40$	$m(11,25)=1$
26.	$q(26)=5$	$m(11,26)=1$	$q(26)=30$	$m(11,26)=1$
27.	$q(27)=55$	$m(12,27)=1$	$q(27)=20$	$m(11,27)=1$
28.	$q(28)=20$	$m(12,28)=1$	$q(28)=45$	$m(12,28)=1$
29.	$q(29)=25$	$m(13,29)=1$	$q(29)=50$	$m(13,29)=1$
30.	$q(30)=15$	$m(13,30)=1$	$q(30)=40$	$m(13,30)=1$
Σ	800	-	830	-

Tabulka č. 6 Výsledné hodnoty časových ztrát a návaznosti jednotlivých spojů pro přílety a odjezdy autobusů [Autor]

	Hodnoty před koordinací (bez posunu)		Hodnoty po koordinaci (s posunem)	
Pořadí (<i>i</i>)	Příjezd spoje <i>i</i> vztažený k bodu 0 (7:00)	Příjezd spoje <i>i</i> vyjádřený běžným časovým údajem	Příjezd spoje <i>i</i> vztažený k bodu 0 (7:00)	Příjezd spoje <i>i</i> vyjádřený běžným časovým údajem
1.	85	8:25	110	8:50
2.	145	9:25	170	9:50
3.	205	10:25	230	10:50
4.	265	11:25	290	11:50
5.	325	12:25	350	12:50
6.	385	13:25	410	13:50
7.	445	14:25	470	14:50
8.	505	15:25	530	15:50
9.	565	16:25	590	16:50
10.	625	17:25	650	17:50
11.	685	18:25	710	18:50
12.	745	19:25	770	19:50
13.	805	20:25	830	20:50

Tabulka č. 7 Posuny příjezdějících spojů [Autor]

	Hodnoty před koordinací (bez posunu)		Hodnoty po koordinaci (s posunem)	
Pořadí (<i>k</i>)	Odjezd spoje <i>k</i> vztažený k bodu 0 (7:00)	Odjezd spoje <i>k</i> vyjádřený běžným časovým údajem	Odjezd spoje <i>k</i> vztažený k bodu 0 (7:00)	Odjezd spoje <i>k</i> vyjádřený běžným časovým údajem
1.	105	8:45	130	9:10
2.	165	9:45	190	10:10
3.	225	10:45	250	11:10
4.	285	11:45	310	12:10
5.	345	12:45	370	13:10
6.	405	13:45	430	14:10
7.	465	14:45	490	15:10
8.	525	15:45	550	16:10
9.	585	16:45	610	17:10
10.	645	17:45	670	18:10
11.	705	18:45	730	19:10
12.	765	19:45	790	20:10
13.	825	20:45	850	21:10

Tabulka č. 8 Posuny odjíždějících spojů [Autor]

Celková časová ztráta před koordinací [min.]	23 065
Celková časová ztráta po koordinaci [min.]	21 635
Časová úspora [min.]	1 430

Tabulka č. 9 Výsledné hodnoty časových ztrát pro oba modely [Autor]

Zastávka	Jízdní řád linky 910100 pro směr Ostrava - Mošnov, původní JŘ												
Ostrava, Poruba, vozovna	7:45	8:45	9:45	10:45	11:45	12:45	13:45	14:45	15:45	16:45	17:45	18:45	19:45
Ostrava, Svinov, nádraží	7:52	8:52	9:52	10:52	11:52	12:52	13:52	14:52	15:52	16:52	17:52	18:52	19:52
Ostrava, Hrabůvka, Hotelový dům Hlubina	8:05	9:05	10:05	11:05	12:05	13:05	14:05	15:05	16:05	17:05	18:05	19:05	20:05
Ostrava, Dubina	8:08	9:08	10:08	11:08	12:08	13:08	14:08	15:08	16:08	17:08	18:08	19:08	20:08
Ostrava, Dubina, Interspar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mošnov, Airport	8:25	9:25	10:25	11:25	12:25	13:25	14:25	15:25	16:25	17:25	18:25	19:25	20:25

Tabulka č. 10 Původní jízdní řád linky 910100 ve směru Ostrava → Mošnov [Autor]

Zastávka	Jízdní řád linky 910100 pro směr Ostrava - Mošnov, navrhovaný JŘ												
Ostrava, Poruba, vozovna	8:10	9:10	10:10	11:10	12:10	13:10	14:10	15:10	16:10	17:10	18:10	19:10	20:10
Ostrava, Svinov, nádraží	8:17	9:17	10:17	11:17	12:17	13:17	14:17	15:17	16:17	17:17	18:17	19:17	20:17
Ostrava, Hrabůvka, Hotelový dům Hlubina	8:30	9:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30	16:30	17:30	18:30	19:30	20:30
Ostrava, Dubina	8:33	9:33	10:33	11:33	12:33	13:33	14:33	15:33	16:33	17:33	18:33	19:33	20:33
Ostrava, Dubina, Interspar	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mošnov, Airport	8:50	9:50	10:50	11:50	12:50	13:50	14:50	15:50	16:50	17:50	18:50	19:50	20:50

Tabulka č. 11 Nově navržený jízdní řád linky 910100 ve směru Ostrava → Mošnov

[Autor]

Zastávka	Jízdní řád linky 910100 pro směr Mošnov - Ostrava, původní JŘ												
Mošnov, Airport	8:45	9:45	10:45	11:45	12:45	13:45	14:45	15:45	16:45	17:45	18:45	19:45	20:45
Ostrava, Dubina, Interspar	9:02	10:02	11:02	12:02	13:02	14:02	15:02	16:02	17:02	18:02	19:02	20:02	21:02
Ostrava, Dubina	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ostrava, Hrabůvka, Hotelový dům Hlubina	9:05	10:05	11:05	12:05	13:05	14:05	15:05	16:05	17:05	18:05	19:05	20:05	21:05
Ostrava, Svinov, nádraží	9:18	10:18	11:18	12:18	13:18	14:18	15:18	16:18	17:18	18:18	19:18	20:18	21:18
Ostrava, Poruba, vozovna	9:25	10:25	11:25	12:25	13:25	14:25	15:25	16:25	17:25	18:25	19:25	20:25	21:25

Tabulka č. 12 Původní jízdní řád linky 910100 ve směru Mošnov → Ostrava [Autor]

Zastávka	Jízdní řád linky 910100 pro směr Mošnov – Ostrava, navržený JŘ												
Mošnov, Airport	9:10	10:10	11:10	12:10	13:10	14:10	15:10	16:10	17:10	18:10	19:10	20:10	21:10
Ostrava, Dubina, Interspar	9:27	10:27	11:27	12:27	13:27	14:27	15:27	16:27	17:27	18:27	19:27	20:27	21:27
Ostrava, Dubina	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ostrava, Hrabůvka, Hotelový dům Hlubina	9:30	10:30	11:30	12:30	13:30	14:30	15:30	16:30	17:30	18:30	19:30	20:30	21:30
Ostrava, Svinov, nádraží	9:43	10:43	11:43	12:43	13:43	14:43	15:43	16:43	17:43	18:43	19:43	20:43	21:43
Ostrava, Poruba, vozovna	9:50	10:50	11:50	12:50	13:50	14:50	15:50	16:50	17:50	18:50	19:50	20:50	21:50

Tabulka č. 13 Nově navržený jízdní řád linky 910100 ve směru Mošnov → Ostrava

[Autor]

Shrnutí dosažených výsledků

Z výše uvedených výsledků optimalizačního výpočtu je zřejmé, že celková časová ztráta na letišti Ostrava se snížila o 1 430 minut. Výsledkem optimalizačního výpočtu je také časový posun celé soustavy autobusových spojů. Ten činí 25 minut. Tato hodnota se přičte k nejdříve možným časovým polohám spojů. Po posunu tedy první autobusový spoj přijede na letiště Ostrava v 8.50 a další spoje budou přijíždět v pravidelných intervalech 60 minut. Poslední spoj bude na letiště Ostrava přijíždět ve 20.50.

První autobusový spoj bude odjíždět z letiště Ostrava v 9.10 a další budou odjíždět v pravidelných intervalech 60 minut. Poslední spoj bude z letiště Ostrava odjíždět ve 21.10.

Závěr

Cílem předložené diplomové práce, bylo vytvořit optimalizační nástroj, který bude sloužit ke snížení časových ztrát, plynoucích z nedokonalé návaznosti spojů dvou dopravních systémů.

V úvodní části práce je věnována pozornost významu řešeného problému a analýze použitelnosti známých optimalizačních metod, zejména metodám pro časovou koordinaci spojů v uzlech a na úsecích dopravní sítě.

Další části práce jsou věnovány popisu situací vyžadujících sestavení modelu časové koordinace vyskytujících se nejen na území České republiky, ale také na území Slovenska. Podstatnou částí práce je analýza zdrojů dostupných vstupních dat pro potřeby modelu, ve které jsou uvedeny zdroje nutné ke správnému řešení zadaného problému.

Návrhová část práce se zabývá tvorbou matematického modelu sloužícího pro časovou koordinaci dvou dopravních systémů, z nichž jeden je provozován v uzavřeném režimu. Sestavený matematický model není v práci uveden pouze v obecné formě, ale je také transformován do optimalizačního software Xpress – IVE, který je schopen účinně modely řešit.

Stěžejní část práce se zabývá výpočetními experimenty s navrženým modelem. Podstatnou stránkou těchto experimentů je ověření správné funkčnosti navrženého modelu a jeho následné použití v konkrétní situaci, tedy v podmínkách linky č. 910100 a návaznosti jejich spojů na charterové lety na letišti v Mošnově.

Závěr práce je věnován zhodnocení výsledků časové koordinace spojů v přestupním uzlu Mošnov, Airport. Výstupy matematického modelu jsou tabelárně zpracovány a uvádějí navázání autobusových spojů na odlety/přílety charterových letů, časovou ztrátu plynoucí z tohoto navázání a posun soustavy autobusových spojů navržený na základě výsledků optimalizačního výpočtu. Bylo zjištěno, že celková časová ztráta v přestupním uzlu Mošnov po provedení časové koordinace autobusových spojů činí 21 635 minut, ve srovnání s hodnotou účelové funkce před provedením časové koordinace autobusových spojů, která činí 23 065 minut. Celkově tato časová ztráta v tomto přestupním uzlu klesla o 1 430 minut při posunu všech autobusových spojů o +25 minut

Použitá literatura

- [1] Plevný, M.: Žižka, M.. Modelování a optimalizace v manažerském rozhodování. Plzeň: ZČU v Plzni, 2005. 296 s. ISBN 80-7043-435-X.
- [2] Surovec, P. Technológia hromadnej osobnej dopravy. Žilina: ŽU v Žilině, 1998. 157s. ISBN 80-7100494-4.
- [3] Kroužil, K. Časová koordinace osobní železniční dopravy v přestupních stanicích na trati Ostrava-Svinov – Český Těšín. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, Fakulta strojní, 2010.
- [4] Letový řád - turistické lety | Letiště Ostrava, a.s. [online]. 2003, 2013 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.airport-ostrava.cz/cz/page-letovy-rad-turisticke-lety/>
- [5] Odbavení na přepážce| Letiště Ostrava, a.s. [online]. [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.airport-ostrava.cz/cz/page-odbaveni-na-prepazce/>
- [6] Dpp.cz > Doprava na letiště – denní provoz | Dopravní podnik hlavního města Prahy. Wwww.dpp.cz [online]. 2008 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.dpp.cz/denni-provoz/>
- [7] Parkování a doprava > Veřejná doprava| Letiště Brno, a.s. Wwww.bruno-airport.cz [online]. 2012 [cit. 2013-05-01]. Dostupné z: <http://www.bruno-airport.cz/parkovani-a-doprava/verejna-doprava/>
- [8] Cestující > Navigácia > Autobusom | Letisko M. R. Štefánika – Airport Bratislava, a.s. Wwww.bts.aero [online]. 2011 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://www.bts.aero/cestujuci/navigacia/na-letisko/>
- [9] Jízdní řád linky 23. Wwww.imhd.zoznam.sk [online]. 2000 [cit. 2013-05-02]. Dostupné z: <http://imhd.zoznam.sk/ke/cestovny-poriadok/linka/23.html>
- [10] Jízdní řád linky 910100. Wwww.morava.veolia-transport.cz [online]. 2000 [cit. 2013-01-05]. Dostupné z: <http://morava.veolia-transport.cz/dopravni-sluzby/jizdni-rady/>
- [11] Kozel, P. Časová koordinace spojů veřejné hromadné dopravy v úseku Frýdek-Místek – Dobrá. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, Fakulta strojní, 2009.

Seznam obrázků

- Obrázek č. 1 Návaznost metra na linky veřejné hromadné dopravy zabezpečující
dopravní obslužnost Letiště Václava Havla v Praze
- Obrázek č. 2 Schématický proces koordinace

Seznam tabulek

- Tabulka č. 1 Vstupní údaje nejdříve možných příjezdů na letiště
- Tabulka č. 2 Vstupní údaje nejdříve možných odjezdů z letiště
- Tabulka č. 3 Vstupní údaje o odletech charterových letů
- Tabulka č. 4 Vstupní údaje příletů charterových letů
- Tabulka č. 5 Výsledné hodnoty časových ztrát a návaznosti jednotlivých spojů
pro odlety a příjezdy autobusů
- Tabulka č. 6 Výsledné hodnoty časových ztrát a návaznosti jednotlivých spojů
pro přílety a odjezdy autobusů
- Tabulka č. 7 Posuny příjíždějících spojů
- Tabulka č. 8 Posuny odjíždějících spojů
- Tabulka č. 9 Výsledné hodnoty časových ztrát pro oba modely
- Tabulka č. 10 Původní jízdní řád linky 910100 ve směru Ostrava → Mošnov
- Tabulka č. 11 Nově navržený jízdní řád linky 910100 ve směru Ostrava → Mošnov
- Tabulka č. 12 Původní jízdní řád linky 910100 ve směru Mošnov → Ostrava
- Tabulka č. 13 Nově navržený jízdní řád linky 910100 ve směru Mošnov → Ostrava